técnica

409

associação dos estudantes do instituto superior técnico

junho 1971

revista de engenharia

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

MEXIA HEITOR E BRASÃO FARINHA

TABELAS PARA O CÁLCULO DO BETÃO ARMADO

TECNICA
revista da associação dos estudantes do Instituto Superior Técnico
LISBOA

10.000 obras realizadas

- coberturas
- perfis especiais
- vigas pré-esforçadas
- pavimento trief
- protecção de segurança
- mosaicos
- tubos

materiais novobra

PAVIMENTOS

EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADOS (HOMOLOGADOS PELO LAB. NAC. DE ENGENHARIA CIVIL)

LEIRIA — PONTE DAS MESTRAS — TEL. 2 37 68
LISBOA — AV. EST. UNIDOS DA AMERICA, 100, 5.º, Dto. — TEL. 77 18 03 - 77 48 32
LAGOA — ESTRADA DO CARMO — TEL. 94

CIMENTO SECIL

SECIL

Fábrica:

Outão — Setúbal

Telef. 228824/5

Escritório:

R. do Comércio, 56-3.º

LISBOA 2

Telef. 328201/2/3

técnica

NÚMERO 409 JUNHO DE 1971 ANO XLVI VOLUME XXXIII PUBLICAÇÃO MENSAL

Director

Guilherme Silva Arroz

Administrador

José Toscano

Secretário

José Sá da Costa

Chefe de Redacção

Francisco Pedroso

Relações Públicas

Raul Pereira da Costa

Redactores

Antonio Mouraz Miranda
José de Oliveira Paulo
José Xambre Bento
Maria Teresa Lemos
Rogério Pinto

Colaboradores

Antonio Vieira Pita
Armando Cardoso
Eduardo Mimoso
Isabel Torgal Miranda

Assinaturas

		5 Nos.	10 Nos.
Continente e Ilhas	—	85$00	160$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	95$00	170$00
Estrangeiro	—		180$00

Número avulso — 25$00

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 103 — Lisboa

SUMÁRIO

479 *LAGINHA SERAFIM* — **Modelos estruturais de grandes dimensões com materiais de características semelhantes aos dos protótipos.**

Structural models in large dimension with materials of similar characteristics to the prototypes.

497 *FERRY BORGES, J. MARÉCOS, TEIXEIRA TRIGO* — **Creep effects in some arch and cantilever bridges.**

Efeito da fluência sobre pontes de arco e cantilever.

503 *F. DURST* — **The application of hot-wire anemometers in low and highly turbulent flows.**

Aplicação do anemómetro de fio quente em escoamento de alta e baixa turbulência.

519 *HELDER COELHO* — **Relógio de cristal de quartzo.**

Digital clock using a crystal oscilator.

523 **Vida Escolar e Associativa**

MANUEL BRAVO — Evolução da técnica, e materiais de construção, em engenharia civil

529 **Bibliografia**

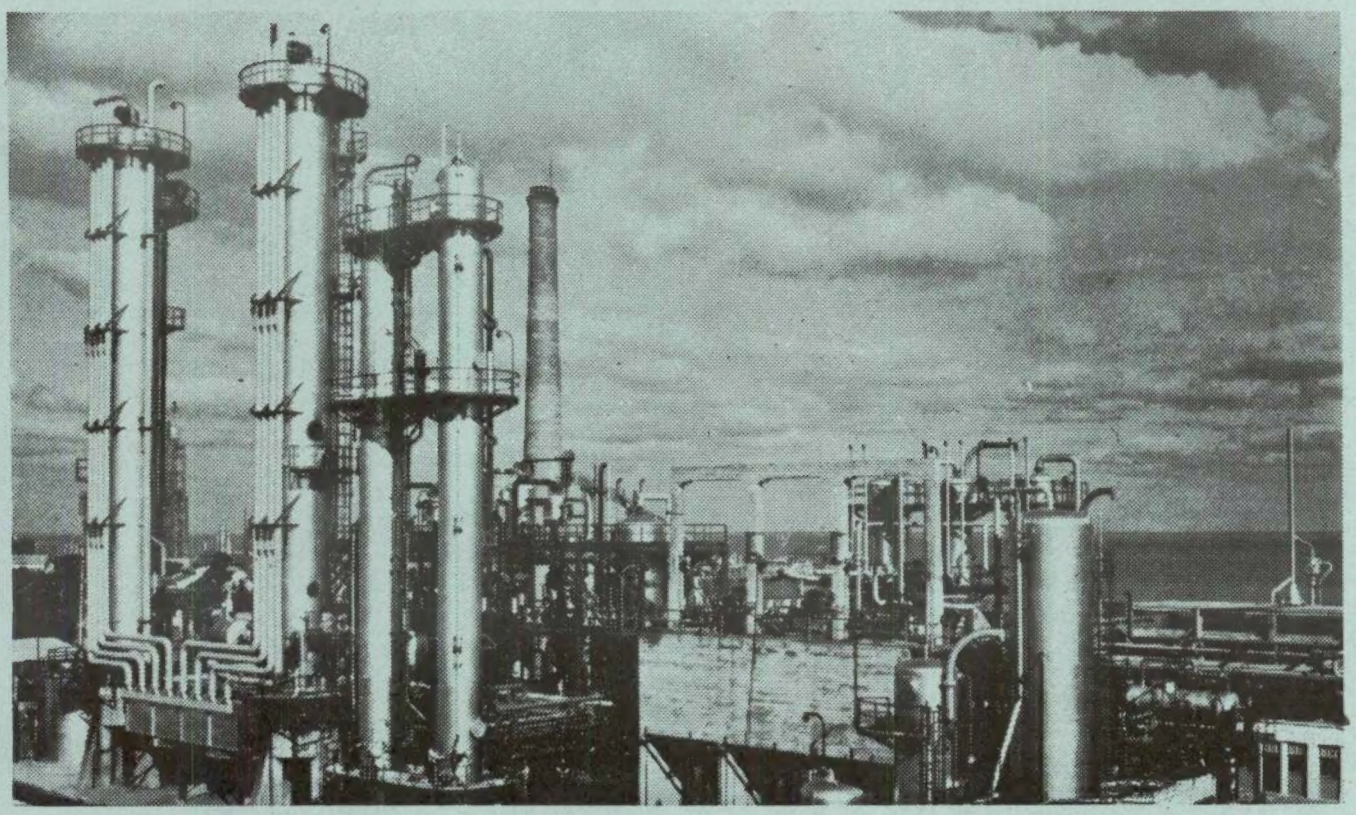
CAPA: Aspecto do sector de construção de matrizes para memórias electrónicas da Fábrica Siemens, no Sabugo

INDICE ALFABETICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd.	XXX
Aguiar & Melo, Lda.	XXIX
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VI
Construções Técnicas	XVII
Construções Schréder	XX
E. Pinto Basto e Comp. Lda.	XXV
EFACEC	XII
Eficex Kienzle	IV
Electro-Arco, Lda.	II
Empresa de Cimentos de Leiria	XXVI
Empresa Electro Cerâmica	XIV
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fanafel	XVI
Fassio, Lda.	XV
Fundações Franki, Lda.	I
Guedes & Almeida, Lda.	IV e VIII
Harker Sumner	XXIV
Heliaço	2.ª da capa
Hoechst Portuguesa	XXIII
Jayme da Costa, Lda.	XIX
Johann Keller	XXV
J. F. Azevedo e Silva	VII
J. Roma	V
Jomatel	XIV
Livros Técnicos	V e XXV
MAGUE	XIII
Mendes de Almeida	XXI
Mobil Oil	XVIII
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Rotring	XXVIII
Siemens	4.ª da capa
Sociedade Portuguesa Cavan	VI
S. K. F. Lda.	XXII
Sondagens e Fundações A. Cavaco	II
Sondagens Ródio, Lda.	V
Sopecate	II
Standard Eléctrica	IX
Time-Sharing	X
Wild Portugal, Lda.	III

espital

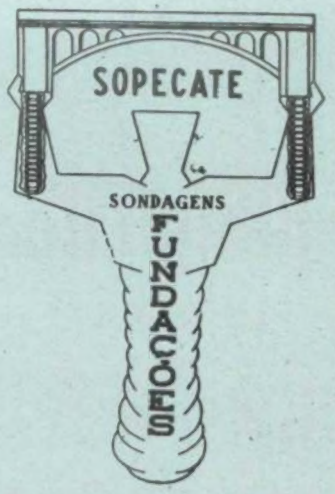
na base da construção moderna: estacas FRANKI, moldadas no solo.



A elevada gama de diâmetros das estacas Franki permite a melhor adaptação a cada problema concreto de fundações, desde a construção mais ligeira até à de grande concentração de cargas muito elevadas. Material permanentemente actualizado e pessoal com especialização constantemente aprofundada garantem a segurança, rapidez e economia das fundações executadas.

FRANKI

Consulte-nos: FUNDAÇÕES FRANKI, LDA. — PORTUGAL



sopecate

sondagens - fundações

ESCRITÓRIO: RUA DO ARSENAL 146 2.º TELEFONES 3 40 10 - 32 02 08 LISBOA

• ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA

• SONDAGENS GEOLÓGICAS

• REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS

• FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA. 62. R C ESQ. — LISBOA - 1

- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS + POSTOS + ACESSÓRIOS

PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

MATERIAL APROVADO PELOS

LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

Agora

para distâncias

até 2000 m

WILD DISTOMAT DI 10

O mais recente modelo do único aparelho de medição de distâncias, por infra-vermelhos, em serviço desde 3 anos, permite alcance até 2000 m e é adaptável aos teodolitos WILD T1A, T16 e T2.

Esta combinação é a ideal para poligonações, levantamentos por radiação e para implantações.

Economiza	**tempo, trabalho, dinheiro**
Aumenta	**precisão, rendimento, lucro**
Aprovado	**desde 3 anos em toda a parte do mundo**
Garantido	**pelos nossos serviços técnicos**

WILD
HEERBRUGG

50 JAHRE · 50 ANS · 50 YEARS · 50 ANNI
1921 1971
WILD HEERBRUGG

Solicitem prospecto detalhado ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8 * TEL. 68 91 12 * LISBOA-2

ESCAVADORAS HIDRÁULICAS
S/RODAS — S/LAGARTAS

— ENTREGAS IMEDIATAS

DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO
GUEDES & ALMEIDA, LDA.
RUA ÁUREA, 181 - 2.° — TELEFONES 32 50 11 - 32 78 45 — LISBOA

CALCULAR...

...instantâneamente, silenciosamente, com economia e segurança.

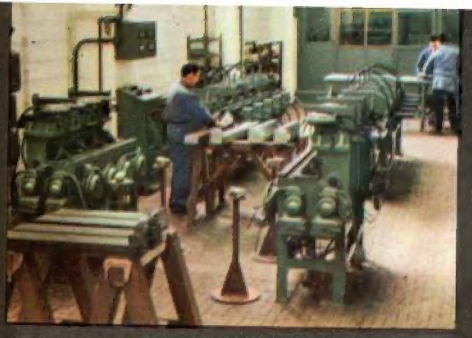
...programa de calculadores electrónicos de CASIO COMPUTER, Co. LTD TÓKYO - JAPÃO

...diversos modelos com as mais evoluídas características para toda a espécie de cálculos.

Demonstrações sem compromisso

- 12 Modelos diferentes.
- 1 Programável.

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:
EFICEX KIENZLE LISBOA: Av. João XXI, 4A - tels 72 70 28 - 72 70 19
DISTRIBUIDORES NO NORTE:
HORBE, LDA PORTO: Rua Faria Guimarães, 105 - tel. 4 33 46



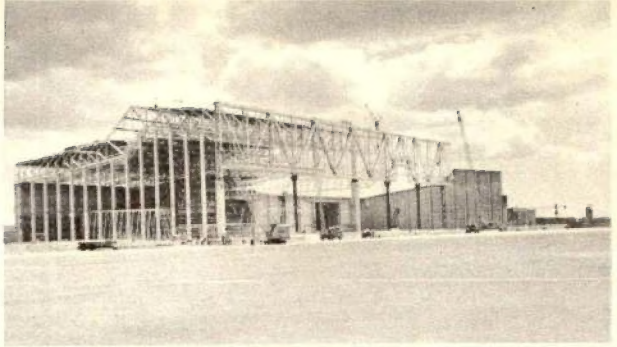
divisão
de
construções
eléctricas

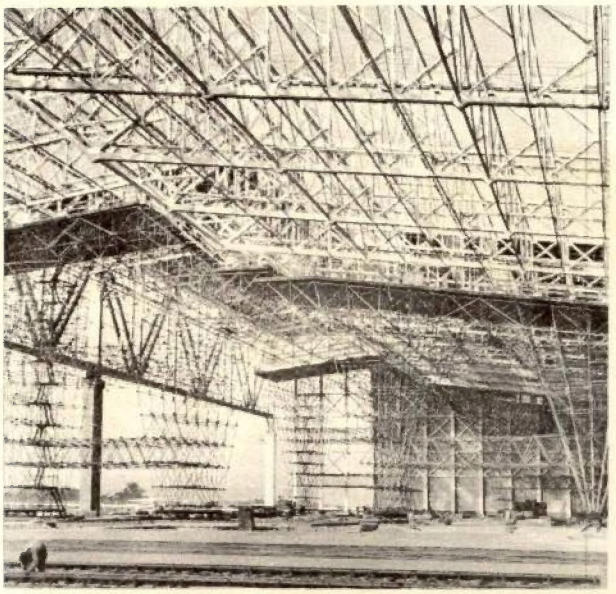
Colaborando no desenvolvimento industrial do país, somos os pioneiros em Portugal na construção de alternadores de média e grande potência

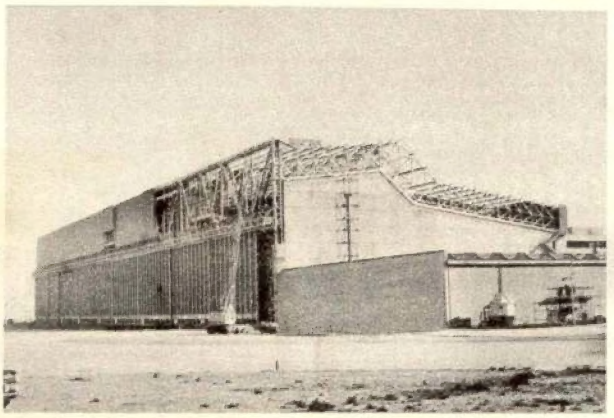
CENTRAL	POTÊNCIA KVA	PARTICIPAÇÃO SEPSA	CENTRAL	POTÊNCIA KVA	PARTICIPAÇÃO SEPSA
MIRANDA (SAAS)	3 x 60.000	30 %	CARRAPATELO (ASEA)	3 x 67.000	15 %
ALTO RABAGÃO (SAAS)	2 x 45.000	50 %	RÉGUA (ASEA)	3 x 58.000	57 %
BEMPOSTA (SAAS)	3 x 78.000	85 %	CORVETE (ASEA)	1 x 1.750	90 %
CHICAMBA (SAAS)	2 x 24.000	95 %	LOMAUN (ASEA)	1 x 18.000	40 %
BUGALHEIRA (SAAS)	2 x 800	95 %	CAMBAMBE (ASEA)	2 x 72.000	95 %
CARREGADO I e II (BBC)	2 x 156.000	20 %	CHIUMBE DALA (ASEA)	2 x 2.500	95 %

Sepsa

SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES ELECTRO-MECÂNICAS, S.A.R.L.
APARTADO 8 * LEÇA do BAILIO * TELEX SEPSA P 2616







NOVO HANGAR DA TAP.

ESTRUTURA METÁLICA MONTADA E FABRICADA PELA SEPSA.
EM REGIME DE SUB CONTRATO PARA AS CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

Na era dos jumbo-jet a SEPSA também está presente. No AEROPORTO DA PORTELA, em LISBOA, construímos para a TAP a estrutura metálica do enorme hangar destinado aos BOEING 747. Com vãos de 138 e 69 metros, uma altura de 31,5 metros, profundidade de 64 metros, é o maior edifício do género no mundo português.

Sepsa SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES ELECTRO-MECÂNICAS, S.A.R.L.
APARTADO 8 * LEÇA do BAILIO * TELEX SEPSA P 2616

Dimensionamento de Secções de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples de secções rectangulares simplesmente armadas
— Flexão simples de secções rectangulares duplamente armadas
a) com armadura de compressão reduzida
b) com armadura de tracção reduzida
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Compressão simples
— Flexão composta de secções rectangulares
a) com armadura simétrica
b) com armadura de tracção reduzida
c) com armadura de compressão reduzida
— Flexão composta desviada de secções rectangulares
— Flexão composta de secções em T
a) com armadura de tracção reduzida
b) comarmadura de compressão reduzida
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas
— Esforço transverso

Preço 150$00

Dimensionamento de Secções Circulares de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas

Preço 60$00

Por J. M. MADEIRA COSTA
ENG.º CIVIL

À venda na TÉCNICA e nas LIVRARIAS

• SOLDADURA ELÉCTRICA
• MATERIAL DE PROTECÇÃO

Aparelhagem de medidas eléctricas

+ indicadora
+ reguladora
+ registadora

J. ROMA, L.DA
P. da Figueira, 12, 1.º — P. do Município, 309-6.º S. 3
LISBOA Tel. 865151 · PORTO Tel. 0236732

SONDAGENS RODIO, LD.

R. S. Bento, 644 - 3.º
LISBOA
TELEFONE: 68 80 96

PORTO
LUANDA
BEIRA

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ESTACAS
PAREDES CONTÍNUAS
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

IBRA

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 32 73 77 — Lisboa

No Norte: **SCIAL** — R. António Feliciano de Castilho, 1126 — Telef. 97 09 32 — Areosa — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS

MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA

Carvam

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1 -TELEF. 47812-50129

JF PROJECTOU E EXECUTOU A

INSTALAÇÃO ELÉCTRICA

DE ILUMINAÇÃO, ALIMENTAÇÃO DE AR CONDICIONADO, TOMADAS E FORÇA MOTRIZ DOS

SUPERMERCADOS MODELO

CAMPO GRANDE

PUBLIMPAR

Fornecendo também:

- POSTO DE TRANSFORMAÇÃO DE 10 kV · 160 kVA
- QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO E QUADROS PARCIAIS DE ILUMINAÇÃO E FORÇA MOTRIZ
- ARMADURAS DE ILUMINAÇÃO DE DESENHO E FABRICAÇÃO PRÓPRIA

JF

J.F. DE AZEVEDO E SILVA & Cª LDA

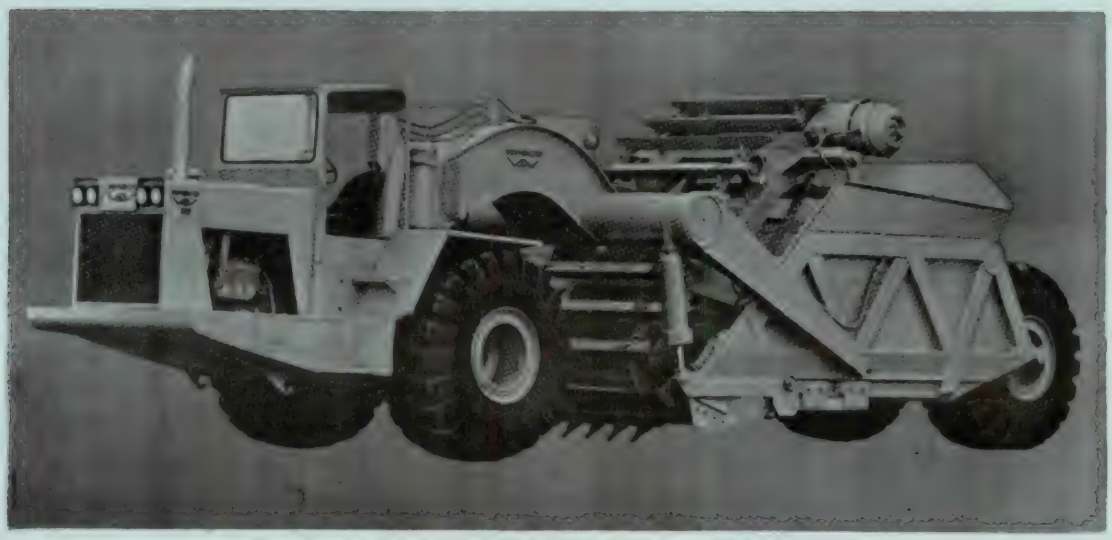
Rua S. Francisco de Sales, 2-1º, Tel. 654165-Lisboa

WABCO
An American-Standard Company

MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADES ATÉ 34 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...



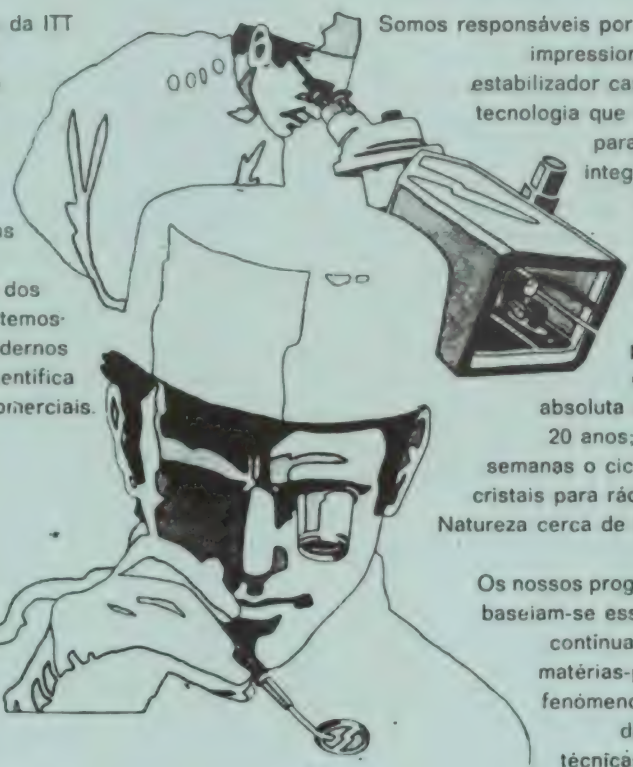
DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

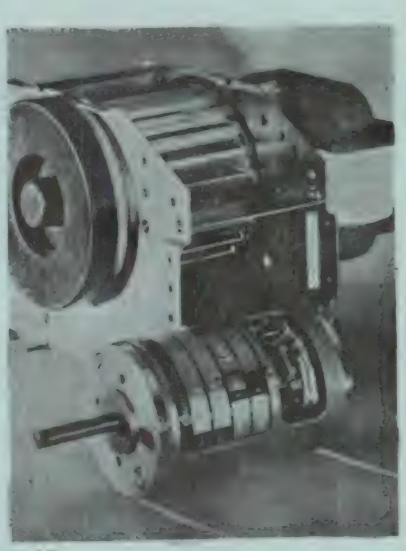
Rua Áurea, 181-2.° — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

A maior rede de especialistas na Europa antecipa-se aos seus problemas

O Grupo de Componentes da ITT Europa tem uma ambição: Não permitir a interrupção da actividade dos seus clientes por falta de componentes.
Conhecendo em todo o pormenor as caracteristicas dos mercados podemos antecipar-nos à resolução dos seus problemas. Por isso temos na Europa Ocidental 4 modernos centros de investigação cientifica que apoiam as divisões comerciais.



Somos responsáveis por alguns resultados impressionantes: O primeiro estabilizador cardiaco baseado na tecnologia que a ITT desenvolveu para os seus circuitos integrados; a produção de amplificadores para cabos submarinos que, submersos a grandes profundidades, têm que funcionar com absoluta segurança durante 20 anos; reduzimos para 3 semanas o ciclo de produção de cristais para rádio o que levaria à Natureza cerca de 3 milhões de anos a conseguir.
Os nossos programas de pesquisa baseiam-se essencialmente numa continua procura de novas matérias-primas e de novos fenómenos físicos, base do desenvolvimento de técnicas e processos que levam ao aparecimento de novos componentes.



Exemplos de componentes ITT

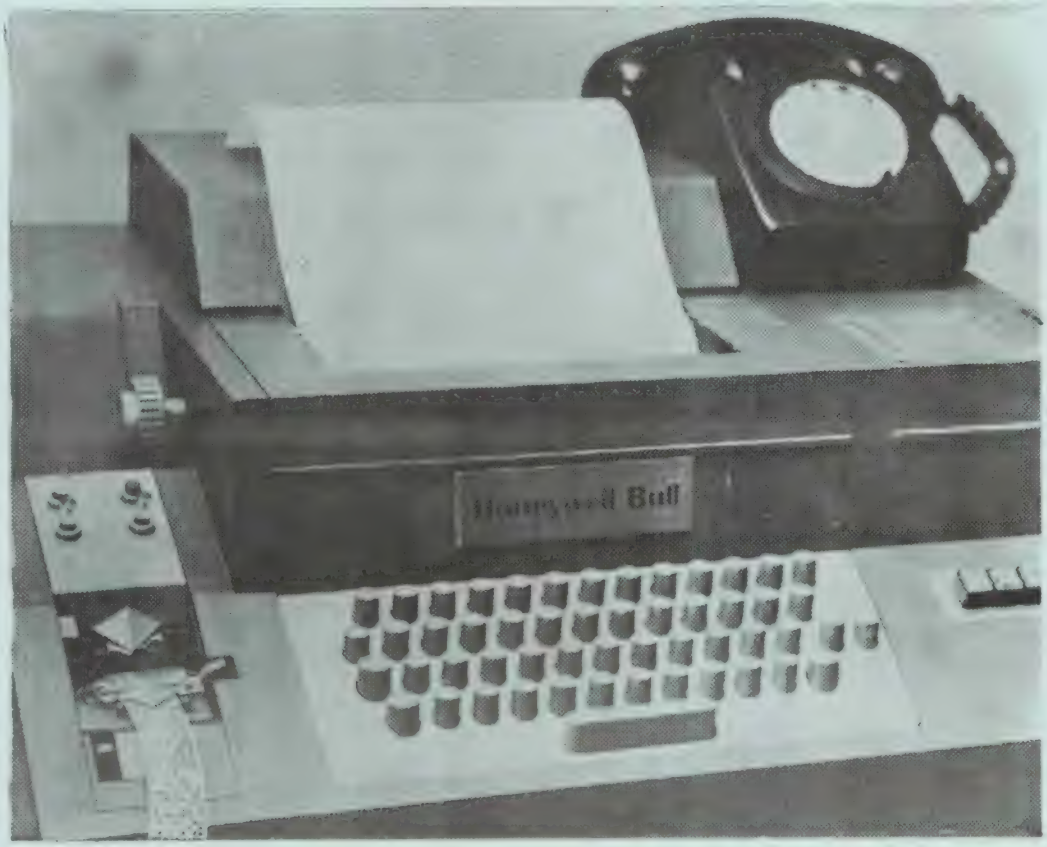
São estes motores e ventiladores largamente usados em aplicações tais como: máquinas de executivo, gravadores de fita magnética, aparelhagem doméstica, projectores, aquecedores de água, sistemas de ventilação e refrigeração, etc.
A gama de motores ITT está prevista para operação unifásica ou trifásica com potências nominais de 0,7 a 78 W. As potências dos motores de corrente continua vão desde 0,25 a 25 W. Existem ainda modelos acoplados a redutores de velocidade.

Para informações completas dirija-se a:
STANDARD ELÉCTRICA, S. A. R. L.
Divisão ITT de Vendas de Componentes
Av. da República, 60, 2.°-D.
Lisboa 1
Telef. 765491

COMPONENTES **ITT**

71/D

TIME — SHARING



- ESTE TERMINAL *
- UM TELEFONE
- UMA TOMADA

* instalado onde desejar

E TERÁ AO SEU DISPOR. INSTANTÂNEAMENTE, TODA A POTÊNCIA DE UM GRANDE COMPUTADOR

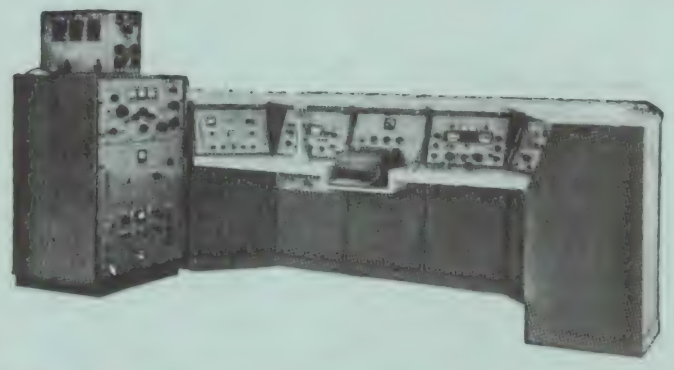
TIME-SHARING

UMA NOVA FORMA DE TRATAR A INFORMAÇÃO

SOCIEDADE PORTUGUESA DE COMPUTADORES
EM TEMPO DIVIDIDO

(TIME-SHARING), SARL.

Avenida 5 de Outubro, 95 - 3.º, - Telef. 769551



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

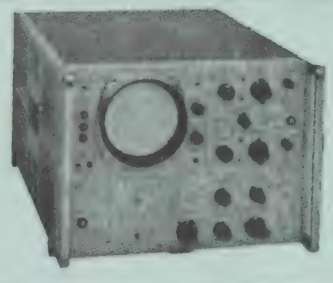
HEWLETT hp PACKARD

aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador Sanborn

Registador digital Dymec



Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TÉCNICA DE EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A.R.L.

AR
renovado

Ventiladores de tecto

EFACEC

Aumente a produtividade do seu pessoal instalando na sua FÁBRICA ou OFICINA os Ventiladores de tecto EFACEC·PDT

- Inteiramente fabricados em poliester reforçado ·fibra de vidro·
- Instalação imediata sem necessidade de qualquer trabalho de construção civil
- Funcionamento silencioso
- Persianas de fecho automático

INSTALAÇÕES DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL E TRANSPORTE PNEUMÁTICO EFACEC

SERVIÇOS COMERCIAIS:
LISBOA·Rua Rodrigo da Fonseca, 76·3º
PORTO·Rua Sá da Bandeira, 706·5º

técnica

NUMERO 409 JUNHO DE 1971 ANO XLVI VOLUME XXXIII PUBLICAÇAO MENSAL

C. D. U. 624 : 620.1

MODELOS ESTRUTURAIS DE GRANDES DIMENSÕES COM MATERIAIS DE CARACTERÍSTICAS SEMELHANTES AOS DOS PROTÓTIPOS*

por J. LAGINHA SERAFIM
Engenheiro Civil, I. S. T.
Presidente da COBA

RESUMO

Descrevem-se os tipos de modelos utilizados no estudo de estruturas e os casos em que se justifica a utilização de grandes modelos. Principios de semelhança e problemas na escolha da escala. A influência dos factores dos materiais e métodos de construção do modelo. Técnicas de ensaio com referência à simulação das solicitações e obtenção dos resultados. Finalidades e conclusões dos ensaios descritos nas várias comunicações apresentadas no Colóquio.

SYNOPSIS

Described herein the types of models used in the study of structures; the cases in which the use of large models is justifiable; the principles of similitude and the problems to be taken into accout when determining the scale of a model; test methods with special reference to load simulation and to the gathering of the results. Also indicated are the objectives and conclusions of the tests described in the various papers submited to the Colloquium.

1. COMUNICAÇÕES APRESENTADAS

Foram apresentadas ao Colóquio 31 comunicações sobre este tema provenientes de dez países (vide lista no final do texto). Subdivididas por assuntos, elas podem agrupar-se da seguinte maneira:

1) Ensaios estáticos sobre modelos em betão fino ou argamassa de elementos de betão armado. (Comunicações n.os 3, 6 e 7).

2) Ensaios estáticos sobre modelos em betão fino ou argamassa de estruturas e elementos em betão préesforçado. (Comunicações n.os 4, 5, 8 e 11).

3) Ensaios estáticos sobre modelos em betão fino ou argamassa de abóbadas em betão. (Comunicações n.os 15, 20, 22, 23 e 30).

4) Ensaios estáticos sobre modelos de elementos constituídos por materiais compostos, como as alvenarias, e de elementos de estruturas em betão e aço, feitos com idênticos materiais. (Comunicações n.os 9, 14, 16, 18, 23 e 31).

5) Ensaios estáticos sobre modelos de estruturas metálicas. (Comunicações n.os 12, 13 e 21).

6) Ensaios dinâmicos sobre estruturas em betão e aço préesforçado. (Comunicações n.os 1, 19 25).

---

* Relatório Geral do Tema 2 do Colóquio RILEM sobre Técnicas e Metodologia de Ensaios Estáticos e Dinâmicos de Modelos e Protótipos de Estruturas, Bucareste, 1969.

Recebido na redacção em 17/3/71

7) Ensaios de resistência a acções sísmicas de modelos de estruturas aporticadas, painéis e suas juntas. (Comunicações n.os 17, 26 e 27).

8) Materiais, técnicas e aparelhagem de ensaio usados no estudo sobre modelos dos efeitos das acções dinâmicas e sísmicas. (Comunicações n.os 2, 10, 28 e 29).

A maior parte dos assuntos referentes a este tema já vinham sendo tratados em outros Simpósios ou Colóquios do RILEM, nomeadamente no Simpósio de Madrid sobre Modelos de Estruturas de 1959, e no Simpósio de Lisboa sobre Modelos de Barragens, em 1963. Outros Simpósios RILEM sobre materiais, como o do México, em 1966, abordaram assuntos de interesse neste domínio. Esta a razão porque não se pretendeu apresentar aqui um tratamento sistemático dos vários aspectos que apresenta o estudo de grandes modelos.

Tentar-se-á fazer a síntese dos problemas levantados nas diferentes comunicações e apresentar as informações e conclusões mais importantes que contêm.

2. ENSAIOS DE ESTRUTURAS EM MODELO

Os modelos utilizados para o estudo de problemas estruturais podem agrupar-se em várias categorias (24). **

1 — Modelos de formas arquitectónicas. Podem ser construídos para determinação do valor de certas forças que actuem sobre a estrutura. Pertencem a esta categoria os modelos rígidos para ensaios aerodinâmicos e alguns modelos hidráulicos.

2 — Modelos em escala reduzida utilizados para o estudo do estado elástico de tensão em estruturas submetidas às cargas de cálculo. Cargas estáticas ou quase estáticas como o peso próprio, as cargas permanentes e temporárias, a pressão hidrostática e as cargas provocadas pela temperatura têm sido consideradas nos ensaios sobre modelos reduzidos. Geralmente as escalas destes modelos variam entre 1/20 e 1/100. Escalas 1/500 foram já utilizadas em modelos elásticos de barragens escalas tais como 1/2000 em modelos fotoelásticos. As características elásticas dos materiais de que é feito o modelo não são necessàriamente as mesmas do protótipo e dependem fundamentalmente do fenómeno em estudo e da precisão dos aparelhos de medida.

3 — Modelos construídos com materiais idênticos ou muito semelhantes aos do protótipo. É o caso típico dos modelos de estruturas em betão fino, argamassa armada, betão préesforçado, alumínio ou aço. No caso de pontes e estruturas de edifícios, as escalas utilizadas estão normalmente compreendidas entre 1/3 e 1/20 e, no caso de grandes barragens de betão, entre 1/50 e 1/200. Pode ser indispensável respeitar a semelhança entre os módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson, curvas tensões-deformações, resistência à rotura ou envolventes de Mohr, extensões de rotura, curvas de fluência e relaxação, constantes térmicas (coeficiente de expansão térmica, difusibilidade, etc.). Este tipo de modelos é especialmente utilizado quando há que considerar a fendilhação, a rotura ou o comportamento não elástico de uma estrutura. Realiza-se frequentemente sobre modelos deste tipo o estudo do comportamento de estruturas sob a acção de cargas variáveis ou aleatórias, em particular sismos.

4 — Modelos de elementos singulares de uma estrutura, tais como juntas, sapatas, ancoragens, painéis, vigas, paredes de alvenaria, etc., em escalas que podem ir até 1/1. Estes elementos podem ser ensaiados usando as técnicas de ensaio e observação de modelos.

5 — Modelos não reproduzindo nenhuma estrutura em particular, em especial os utilizados para a verificação de métodos analíticos. A comunicação n.º 25 refere modelos deste tipo em betão armado.

O estudo de estruturas em modelo sofreu depois de 1950 um grande incremento em vários países. Apesar da generalização do uso dos computadores, a partir de 1960, ter reduzido a importância dos modelos no projecto e na investigação estrutural, o seu interesse continua a ser grande. Muitos Laboratórios, Institutos e Universidades adquiriram uma experiência importante na sua construção,

---

** Os números entre parêntisis referem-se às comunicações apresentadas a este Colóquio.

nas técnicas de ensaio e na interpretação dos resultados obtidos, criando renome internacional. Há que referir o trabalho pessoal do Prof. EDGAR CARDOSO que, nos últimos 25 anos, tem utilizado intensivamente esta técnica no cálculo de pontes.[1]

Apesar do interesse pelos modelos elásticos ter diminuído, alguns casos justificam ou exigem a utilização de grandes modelos para serem ensaiados no domínio elástico e à rotura. São os casos de estruturas grandes, dispendiosas, pouco usuais, muito complexas, perigosas ou muito repetidas. No caso de estruturas muito complexas o ensaio em modelo permite frequentemente escolher entre vários métodos aproximados de cálculo. Isto é particularmente verdadeiro no caso de cascas de dupla curvatura, com nervuras, elementos de contorno e armaduras.

Os modelos podem ser construídos com vários materiais e a diferentes escalas, de acordo com o tipo da estrutura (vigas, recipientes, pontes, cascas, barragens abóbada, barragens de gravidade, lajes, etc.). São objecto deste relatório apenas os grandes modelos construídos com os mesmos materiais que o protótipo.

3. MOTIVOS QUE JUSTIFICAM A UTILIZAÇÃO DE GRANDES MODELOS

Para o estudo do comportamento de uma estrutura em que se desenvolvem campos de tensão complicados, ou por ser complexo o comportamento dos materiais que a formam ou devido às condições especiais de carga, efeitos de inércia e ressonância, o ensaio de grandes modelos em laboratório pode fornecer informações que em muitos casos não poderiam ser obtidas por métodos numéricos de cálculo ou pela análise matemática. Outras vezes, porque os pormenores da estrutura só podem ser convenientemente reproduzidos em grandes modelos, são estes utilizados no estudo de problemas de elasticidade perfeita. Para tornar realizáveis tais modelos e facilitar a sua construção usam-se os mesmos materiais que são utilizados no protótipo.

Os invólucros de reactores nucleares em betão préesforçado são exemplos de estruturas que apresentam problemas singulares devido às condições especiais a que estão sujeitas (4) (grandes amplitudes e gradientes térmicos, elevada pressão interior, distribuição complexa de tensões devido à importante espessura e ao grande número de orifícios nas suas paredes, fluência do betão e outros efeitos dependentes do tempo). Por outro lado, exige-se que estas estruturas não apresentem fendilhação quando em carga, o que obriga a preesforçá-las cuidadosamente. O problema da localização de um grande número de cabos e da perda de préesforço em cabos curvos, devido à fricção, vem somar-se às dificuldades já apresentadas e torna a análise experimental da estrutura sobre o modelo bastante útil. No entanto, esta análise só fornece informações completas quando são utilizados modelos executados com o mesmo material do protótipo. Ùltimamente têm sido apresentados com muita frequência estudos em modelo de invólucros em betão préesforçado para reactores.[2]

As cascas, que em muitos casos apresentam complicações que impossibilitam a utilização de métodos matemáticos, estão sendo ensaiadas em muitos laboratórios sobre grandes modelos feitos dos mesmos materiais dos protótipos. Para formas complicadas alguns autores afirmam que a determinação teórica das tensões e deformações é pràticamente impossível (20). Os ensaios realizados sobre os protótipos fornecem informações de grande importância mas não podem ser de utilidade para o projecto da própria estrutura. Hoje em dia os resultados obtidos em ensaios à rotura sobre modelos de cascas são frequentemente usados no projecto de estruturas deste tipo. Os problemas levantados pela actuação de cargas assimétricas ou acidentais com distribuição aleatória e intensidade variável, como é o caso dos ventos e dos sismos, não foram abordados nas comunicações apresentadas.

Começa a generalizar-se o uso de estruturas em «sandwich», tais como painéis para a construção civil e algumas cascas. São de utilidade, para a avaliação de seu comportamento, os ensaios realizados em modelos à escala natural sob diferentes condições de carga (23).

---

(1) Ver referências no final do texto.

A ligação dos elementos préfabricados que constituem uma estrutura apresenta também problemas para a resolução dos quais vêm sendo ensaiados grandes modelos. No comportamento dinâmico de estruturas esbeltas, o factor de amortecimento e a ignorância sobre o comportamento vibratório das ligações e apoios são factores «que impedem a utilização de métodos teóricos que conduzam a soluções satisfatórias». «Os modelos devem ser projectados de modo a reproduzir com bastante rigor as características de amortecimento do protótipo» (1). São estas algumas das razões que levam a utilizar, nos modelos, materiais e métodos construtivos idênticos aos do protótipo com pequeno factor de escala.

No caso de elementos estruturais em betão préesforçado, é importante determinar a carga para a qual o betão, que trabalhava à compressão por efeito do préesforço dos cabos, passa a trabalhar à tracção. Tal facto só deve ocorrer quando a carga aplicada ultrapassar largamente o seu valor de serviço. Neste caso, o comportamento da estrutura durante a fase de instabilidade é muito importante e, frequentemente, o problema só pode ser estudado através do modelo.

Estruturas de edifícios e outras estão sendo ensaiadas em laboratório à escala natural, com as mesmas técnicas utilizadas em grandes modelos (9). Estes ensaios podem realizar-se em condições bem definidas (de ambiente e carga), o que não acontece quando tais estruturas são ensaiadas no seu próprio local de implantação.

Com respeito a estruturas de betão armado, uma vez que só trabalham nas condições de cálculo quando surge fendilhação nas zonas à tracção, só podem ser convenientemente estudadas quando a fendilhação se desenvolve também no modelo. Esta razão é suficientemente importante para justificar o estudo de grandes modelos construídos com materiais semelhantes aos do protótipo. É óbvio que ao reduzir a escala, certos fenómenos e singularidades do comportamento da estrutura não se reproduzem da mesma maneira no modelo e no protótipo. É o caso do desenvolvimento da fendilhação, que está relacionado com a distância real entre fendas, com as tensões instaladas no material, com o seu modo de colocação e fabrico, com o método utilizado na construção da estrutura, etc. Por este motivo, em alguns casos, é necessário reproduzir as estruturas de betão armado com as mesmas dimensões do protótipo e utilizando as mesmas técnicas construtivas. Os primeiros trabalhos sobre modelos em grande escala de elementos e estruturas em betão armado foram realizados em vários Institutos e Universidades muito antes de 1940 (lembramos, relativamente aos anos 30, os trabalhos clássicos das Universidades de Viena e Illinois).

Para o estudo do comportamento à rotura de estruturas metálicas, é importante localizar os elementos e as zonas que atingem o limite de cedência e se tornam plásticas. O colapso final de uma construção ocorrerá ràpidamente no caso de não haver zonas que se comportem plàsticamente antes da rotura.

A rotura* de uma estrutura assinala a sua capacidade de resistência a cargas. Como as construções protótipo não podem ser ensaiadas à rotura, admite-se que grandes modelos construídos com materiais semelhantes podem fornecer informações muito úteis não só sobre a sua capacidade limite de resistência, mas também sobre o modo como a rotura se processa quando a carga atinge os valores máximos ou quando é repetida um certo número de vezes. Os ensaios à rotura fornecem também indicações sobre as diferentes maneiras pelas quais os materiais podem resistir e como essa resistência à rotura é condicionada pelas suas propriedades reológicas. Os resultados obtidos deste modo permitem verificar os critérios usados no cálculo analítico. Dada a complexidade do fenómeno, tem sido difícil estudar a rotura a partir de modelos matemáticos. Por outro lado, ao entrar em consideração com as acções sísmicas, parece de grande interesse admitir, desde logo, que estas podem levar à rotura. De facto, os sismos são uma das forças mais assustadoras e destrutivas da natureza (2). Com o objectivo de minimizar os seus efeitos desastrosos, há que estudar teórica e experimentalmente a sua acção sobre as estruturas, edifícios e habitações. Têm sido realizados grandes progressos na análise teórica através de diferentes modelos matemáticos que não só traduzem cada vez

* Cedência, rotura e colapso final de uma estrutura são três noções distintas.

mais fielmente as características das estruturas actuais mas descrevem as vibrações em si mesmas. Para o refinamento destes modelos matemáticos é necessário recorrer a ensaios dinâmicos sobre as estruturas ou ensaios à rotura sobre modelos. Existe o consenso, cada vez mais generalizado, de que o estudo das estruturas sob a acção de sismos tem que ser feito pela consideração do seu comportamento até à rotura. De um modo geral as estruturas não resistem aos sismos dentro dos seus limites elásticos.

A previsão do comportamento de grandes edifícios durante sismos violentos é hoje em dia um importante assunto de investigação. O problema é complexo e a experiência existente não é considerada suficiente. Alguns caminhos promissores para a investigação dentro deste domínio são a observação de casos de grandes sismos afectando cidades importantes e o estudo dos edifícios arruinados e não arruinados, a investigação sobre grandes modelos em laboratório e a vibração de edifícios com máquinas de excitação (26). Os ensaios, quer estáticos quer dinâmicos, realizados sobre painéis, são básicos para o estudo do comportamento dos elementos préfabricados usados na construção rápida. Será de grande interesse a troca de informações sobre os resultados de ensaios semelhantes obtidos em diferentes países.

O comportamento das alvenarias sob a acção de sismos tem sido estudado em grandes modelos. Têm sido assunto de investigação: a influência do reforço das alvenarias por meio de ligações em betão armado, a influência das cargas verticais no comportamento de alvenarias sujeitas a cargas horizontais, a importância da espessura das paredes, e vãos das portas, etc. (18). Foram usados em modelos para ensaio do comportamento sísmico das alvenarias tijolos com dimensões reduzidas à escala 1/4 (18).

A resposta de estruturas metálicas a cargas dinâmicas para além dos limites de elasticidade, do ponto de vista das frequências naturais ou dos coeficientes de amortecimento, depende do grau de plastificação ou cedência dos seus membros. Este problema tem sido analisado matemàticamente, como não linear, por métodos como o da análise variacional[9] (Galerkin-Ritz) e o método da fase plana ou por métodos de integração numérica[20]. No caso de sistemas inelásticos ou não lineares, a análise dinâmica destas estruturas torna-se mais difícil por causa da variação de espessura, da irregularidade da função que exprime o estado da carga ao longo do tempo e da complexidade da função de amortecimento (19). Frequentemente estas dificuldades vêm tornar mais vantajosa a investigação experimental. É de notar que o comportamento plástico dos elementos e das ligações é a razão da segurança observada nas estruturas sujeitas repetidamente a acções dinâmicas importantes, como acontece com as estruturas metálicas em zonas sujeitas a sismos.

Não foram apresentadas a este Colóquio comunicações acerca de ensaios em grandes modelos de barragens, com excepção do estudo sobre modelos reduzidos apresentado na comunicação (10). Este assunto foi no entanto largamente tratado em outras reuniões, em especial no Simpósio RILEM sobre Modelos de Barragens de 1964, em Lisboa.

Há que referir aqui a crescente importância dos modelos no estudo de problemas geomecânicos de macissos rochosos e sua escavação, e no estudo da segurança das fundações de grandes barragens[3]. Os problemas respeitantes a grandes escavações, taludes rochosos, túneis e outras construções subterrâneas têm sido abordados através do estudo em modelo.

Pelas comunicações apresentadas pode concluir-se que os ensaios sobre grandes modelos em que se utilizam os mesmos materiais do protótipo, são uma ferramenta importante para o estudo e resolução de problemas estruturais, apesar da generalização do uso dos computadores.

4. PRINCÍPIOS DE SEMELHANÇA

As leis de semelhança que condicionam a construção do modelo e a interpretação dos resultados das medições podem ser deduzidas da teoria que rege o fenómeno em estudo ou através da análise dimensional[4]. Por exemplo: os factores de semelhança para a determinação das tensões ou deslocamentos no estado elástico devido às variações de temperatura podem fàcilmente ser determinados a partir da teoria da elasticidade; sendo o fenómeno térmico de curta duração, a teoria

da difusão do calor permitirá obter fàcilmente os factores de escala da temperatura, tempo e difusibilidade[5]. Por outro lado, como é sabido, os teoremas de Buckingham sobre a análise dimensional fornecem um outro método de cálculo dos factores de semelhança. Beaujoint fez, em 1959, no Simpósio de Madrid[6], a apresentação da teoria de modelos e semelhança, que incluia uma lista bibliográfica completa. Livros bem conhecidos como o de Langhaar, dos Estados Unidos e A. Nazarov da U.R.S.S., tratam em grande pormenor a teoria da semelhança.

Os factores de escala, as propriedades dos materiais do modelo, a capacidade do sistema de carga a usar, a possibilidade de reproduzir formas complicadas e detalhes estruturais assim como a precisão das medições, tudo são problemas que há que ponderar ao projectar um modelo e programar os ensaios. Embora na construção do modelo se utilize trabalho muito especializado, há em geral que considerar que «o rigor dimensional que se consegue obter na construção de um modelo decresce em proporção com a sua escala» (1). Outros condicionamentos importantes que determinam a escala do modelo são as dimensões da estrutura e o espaço disponível no laboratório.

A reprodução de factores dependentes do tempo (comportamento viscoelástico, progresso da rotura para cargas prolongadas, número de repetições de carga) está-se tornando cada vez mais importante e novas condições de semelhança devem ser estudadas tomando este facto em consideração. Os problemas tratados, em 1958, no Simpósio RILEM de Munique sobre o Efeito do Tempo na Resistência e Deformação do Betão, devem ser tomados em consideração quando do estudo da semelhança em ensaios de rotura.

As teorias sobre a semelhança na rotura e a prática de ensaios em grandes modelos, para além dos limites de elasticidade, foram discutidas por Oberti em diferentes ocasiões[7]. Rocha e Serafim[8] deduziram as condições de semelhança para modelos de barragens ensaiadas à rotura e salientaram a importância do conceito de coeficiente de segurança na semelhança a garantir nos modelos.

Uma teoria a considerar sobre a semelhança mecânica entre sólidos deformáveis foi apresentada por Nazarov[11], que analisou os processos estáticos e dinâmicos assim como os problemas da encurvadura e da fendilhação. No caso do betão, a curva tensões-deformações até à rotura e, no caso do aço, o ponto de cedência e a ductilidade, são factores muito importantes a reproduzir com os materiais do modelo. Tanto estes factores como outros que controlam a formação de fendas, devem ser considerados fundamentais na semelhança dos modelos de estruturas de betão armado e préesforçado (6).

As teorias estatísticas acerca da semelhança estrutural apresentadas por Ferry Borges[12] fornecem conclusões de interesse acerca da escala dos modelos feitos como os mesmos materiais do protótipo. Este método de tratamento do problema deve ser considerado atentamente quando se trabalhe com processos estocásticos, como sismos e outras cargas de intensidade e distribuição aleatórias. De facto as características das acções sísmicas com as suas flutuações erráticas sugerem o interesse dos modelos estatísticos. Pode obter-se um modelo simples admitindo uma distribuição Gaussiana com média zero e homogénea no tempo sendo as oscilações de duração constante. Parece também apropriada a consideração de uma densidade de potência e duração constantes, em estudos de engenharia. Com base nestas considerações foi descrito um modelo matemático das acções sísmicas, assim como os métodos de avaliação dos resultados obtidos em ensaios sísmicos (10). De acordo com a natureza física da energia potencial que dá origem à força de restituição da estrutura durante um sismo, foram definidos dois casos ideais: Leis de semelhança de Cauchy e de Froude. A primeira é aplicada quando esta força resulta de um potencial elástico e a segunda quando deriva de um potencial gravítico (10).

5. MATERIAIS E MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS

A maior parte das estruturas de engenharia civil estudadas em modelo são feitas de betão ou aço. Portanto, os materiais mais frequentemente usados na construção dos modelos serão o betão fino e o aço. O caso das alvenarias e do alumínio serão também de considerar. No caso do betão armado é necessário levar em conta os aspectos importantes que assume a interacção entre os dois

materiais, em especial a sua aderência e o número e forma das fendas[12], que podem desempenhar um papel importante no seu comportamento (7). No caso de estruturas préesforçadas deverão ser usados no modelo um microbetão forte e um aço duro. Os elementos em alvenaria são reproduzidos com vantagem em modelo por materiais semelhantes em escala reduzida (18). As propriedades destes materiais devem ser relacionadas com as propriedades do protótipo pelas suas condições de semelhança, ainda que de um modo aproximado.

Os microbetões e as argamassas têm sido usados vulgarmente no caso de variados modelos estruturais. Estes podem dividir-se em vigas, lajes, cascas, pontes e grandes barragens de betão. Os microbetões não devem conter inertes com dimensão máxima superior a 1/3 da dimensão mínima do elemento a moldar (24). Está provado que estes materiais podem ser utilizados em modelos para a determinação das tensões devidas à temperatura[5].

Na comunicação (24) são apresentadas a resistência e outras propriedades mecânicas de vários microbetões usados em modelos no Instituto de Investigação sobre o Betão Armado da Rússia. É aconselhada uma vibração cuidadosa do microbetão e a sua protecção com serradura molhada durante algum tempo (22). É recomendado o uso do cimento Portland de presa rápida e de cimentos expansivos na confecção dos microbetões a usar na construção dos modelos. Por vezes são usados cimentos com gesso ou cimentos pobres, especialmente em grandes modelos de barragens e suas fundações[3]. No Laboratório ISMES, em Bergamo, Itália, têm sido usadas argamassas celulares, tendo as suas propriedades sido já analisadas exaustivamente em diversas ocasiões. Este material apresenta a vantagem de possuir uma pequena resistência e um baixo módulo de elasticidade, apresentando-se com uma curva de tensões-deformações semelhante à do betão[13]. Pode concluir-se das comunicações apresentadas que, de um modo geral, as argamassas e betões finos utilizados têm resistência à compressão que varia entre 200 e 500 kg/cm^2 e módulo de elasticidade em compressão entre 200000 e 350000 kg/cm^2 na altura do ensaio. Pode-se portanto dizer que estas propriedades dos materiais dos modelos são aproximadamente as mesmas dos materiais dos protótipos. O estudo do doseamento dos inertes, cimento e água já foi referido em várias comunicações. As técnicas de construção e ensaio de modelos estruturais têm sido discutidas detalhadamente em inúmeras publicações recentes assim como no Symposium RILEM de Madrid já mencionado. Através de publicações recentes[14] pode ficar-se com uma ideia razoável acerca da presente situação neste domínio.

O diâmetro dos arames de aço temperado usados em modelos de betão armado, varia de 1 a 8 mm, dependendo das escalas dos modelos e do rigor da sua construção. O problema da aderência foi considerado por vários autores. Com vista ao aumento da aderência foram preparados em laboratório arames enferrujados e corroídos.

No caso de betões préesforçados, uma vez reproduzida a forma, a capacidade de resistência, deformabilidade e resiliência dos cabos, o número de arames não é importante. O que conta em primeiro lugar é a carga de rotura dos cabos usados. Normalmente é muito difícil reproduzir em pormenor a forma e o número dos varões das estruturas de betão armado. Este motivo pode ser determinante, levando à utilização de escalas maiores, podendo ir até 1/1.

Para situar e envolver os cabos dos modelos de peças ou estruturas em betão préesforçado têm sido muito utilizados tubos de plástico. Têm-se utilizado cofragens e modelos em madeira, plástico, gesso, cimento e metal.

Os factores mais importantes que condicionam a escolha do material a usar nas cofragens são a facilidade da execução, o rigor das formas e o número de vezes que vão servir. Os erros que se podem cometer nas formas, dimensões, curvaturas e espessuras, têm que ser estudados e especificados antes da construção. As medições finais destas dimensões podem ser feitas depois dos ensaios, em especial quando se procede à destruição dos modelos. Os resultados finais deverão ser corrigidos em seguida. A vibração dos microbetões ou argamassas é muito importante para garantir a sua homogeneidade e propriedades.

A construção de modelos deve seguir regras que tomem em consideração o problema das tensões internas devidas à construção, os problemas de secagem superficial, da reprodução de formas e detalhes, da distribuição dos materiais na estrutura, etc.

Todos estes aspectos mencionados são importantes na construção de modelos de cascas. Apesar de terem sido assinaladas, em algumas publicações, certas simplificações de pormenor, os modelos de cascas tendem a assemelhar-se ao protótipo. Foi também referida por vários autores a necessidade de verificar cuidadosamente os valores das espessuras e curvaturas dessas construções.

Um problema importante que surge ao trabalhar com modelos de estruturas metálicas é a dificuldade em simular o comportamento das juntas e ligações, especialmente quando estas são rebitadas ou aparafusadas, por dificuldade na definição do seu grau de rigidez. Até mesmo as juntas soldadas podem apresentar dificuldades em estudos sobre modelo, devido à introdução de tensões internas na estrutura. Nos modelos de estruturas metálicas usam-se elementos de dimensões reduzidas, com forma e propriedades semelhantes às do protótipo (19). Por vezes é impossível obter modelos reduzidos de peças com secção em L, I, T, Z e outras, tornando-se difícil a realização da semelhança geométrica. Em muitos casos estas formas foram produzidas em laboratório a partir de peças de aço com a espessura conveniente, com vista a obter, pelo menos, as secções e momentos de inércia requeridos pela semelhança elástica, dentro do rigor exigido pela Resistência dos Materiais.

Na comunicação n.º (12) é apresentado um estudo sobre as dimensões mínimas dos elementos metálicos a usar na construção de modelos. Os erros nas medições podem resultar da curvatura do elemento, da espessura da fita adesiva dos extensómetros, da inclinação do instrumento de medida em relação ao eixo, etc.

O INCERC da Roménia ensaiou modelos metálicos de vários tipos de estruturas usadas em coberturas tridimensionais, incluindo abóbadas geodéticas, com escalas que variam desde 1/6 a 1/10 (21). A utilização de tubos de alumínio na construção de modelos de estruturas metálicas tridimensionais apresenta várias vantagens. Permite construção rápida e simples, e as cargas sobre o modelo podem ser reduzidas, uma vez que o seu módulo de elasticidade é menor que o do aço. A ligação dos tubos de alumínio foi feita por meio de juntas simples (21). Como já foi dito, um dos problemas mais complexos na construção de modelos de estruturas metálicas é a ligação dos elementos. Aqui a habilidade do construtor é muito importante.

Os modelos que foram objecto das comunicações apresentadas variam em escala entre 1/1, para modelos de pormenores de construção, e 1/20.

6. TÉCNICAS DO ENSAIO

Além da precisão na construção dos modelos e das suas propriedades, um ponto essencial a recordar no ensaio de modelos é que estes devem corresponder a condições muito bem definidas. O modelo não deve ter nem criar durante os ensaios tensões internas desconhecidas, a carga deve ser definida com precisão, não se devem produzir variações de temperatura e humidade nem vibrações indesejáveis durante o ensaio. As radiações solares directas e outras provenientes de outras fontes de radiação de calor podem comprometer o rigor das medições. Por isso é importante considerar que as condições de ensaio mais apropriadas são as que existem em salas completamente fechadas possuindo ar condicionado que mantenha as condições de temperatura e humidade de modo a não introduzir «efeitos de pele» nos modelos.

Têm sido utilizadas, na aplicação de cargas estáticas a modelos de estruturas, máquinas de ensaio, prensas hidráulicas (3), macacos, sistemas de macacos, guinchos, sistemas de alavancas, pesos, arames, fios, e outros instrumentos. Todos estes instrumentos de carga devem ser tais que reproduzam fielmente as cargas de serviço que vão ser consideradas como actuando na estrutura. Como a maior parte dos ensaios em grandes modelos são levados até à rotura, o sistema de carga deve ser projectado com suficiente potência. Quando as cargas são aplicadas por pesos, tanto directamente como através de guinchos ou sistemas de alavancas não há problema na determinação exacta do seu valor. No entanto, quando são aplicadas por instrumentos que usam a pressão de líquidos ou gases é necessário ter um cuidado especial na medição rigorosa do valor das cargas aplicadas. Em muitos casos requere-se o uso de instrumentos rigorosos de medição de forças ou pressão. Esta medição

MAGUE

Ponte metálica com 31,2 m de vão, para caminho de ferro, fornecida à C. P. e instalada já em Monte do Trigo

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS — *Projecto e fabrico*

TURBINAS HIDRÁULICAS — *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*

TURBINAS A VAPOR — *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*

CALDEIRAS A VAPOR — *Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*

EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

A utilização de betão pronto impôs-se
ao dono da obra,
ao técnico responsável
e ao empreiteiro
porque garante qualidade,
rapidez e economia
em relação
a um betão fabricado em estaleiro.

Consulte-nos.

Os nossos serviços técnicos
e comerciais
terão o maior prazer em prestar
todo o apoio
e colaboração
que nos forem solicitados.

UMA NOVA MARCA DE BETÃO PRONTO

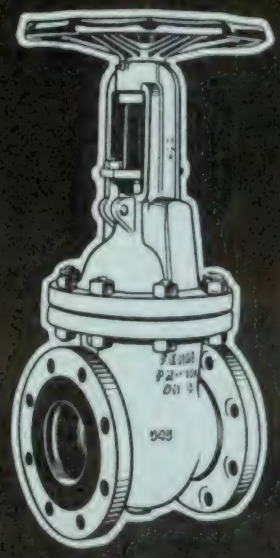
JOMATEL

TECNICA XIV

SP. BUÇO-PORTUGUÊS | 286/439/A

VÁLVULAS

de cunha,
retenção, regulação
e passagem



Segundo normas DIN e ASA,
para líquidos, vapores e gases
(incluindo Cl, NH_3 e SO_2).
Execução em ferro fundido, aço
vazado, aço inoxidável
e ligas especiais.
Diâmetros nominais de 10 a 600mm.
Pressões nominais de 4 a 40 kg./cm².

ESTUDOS • PROJECTOS
ORÇAMENTOS
ASSISTÊNCIA TÉCNICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE VÁLVULAS, L.DA

Rua da Academia das Ciências, n.º 5,
Lisboa-2 - Telefone P.P.C.A. 320011.

rigorosa pode ser feita tanto por meio de células de carga como por anéis dinamómetros. As próprias máquinas de ensaios estão por vezes equipadas com instrumentos precisos de medição das forças aplicadas ao modelo.

No ensaio de modelos de cascas a aplicação das forças tem sido feita quer directamente quer por meio de macacos, sistemas de macacos, alavancas, e almofadas pneumáticas, sendo as forças aplicadas por cima ou por baixo dos modelos. Este sistema utiliza frequentemente arames para a transmissão das cargas. O INCERC (20) construiu um sistema especial de cabos, alavancas e aparelhos de medição de forças que permite carregar modelos de vários tipos podendo o período de duração da força ser muito prolongado. Este sistema mecânico foi substituir uma instalação que utilizava macacos hidráulicos.

O problema da aplicação de cargas de tipo hidrostático a modelos de estruturas submetidas à pressão da água ou outros líquidos (barragens, tanques, reservatórios e outras estruturas semelhantes) foi resolvido de várias maneiras, usando mercúrio, séries de sacos de borracha cheios de fluidos a diferentes pressões, sistemas de macacos, etc. Como já foi dito, a simulação das hipóteses de carga determina a escala e as técnicas de construção e ensaio dos modelos. Em especial quando se trata de estudar a rotura de modelos, o processo mais vulgar é a utilização de «famílias» de macacos de diferentes diâmetros. A técnica de carga que se baseia na utilização de líquidos ou suspensões de densidade crescente (que não pode ir além de 3,0) foi muito usada. Torroja, em Espanha, desenvolveu esta técnica de carga até à rotura sobre modelos de barragens arco construídos com areia aglomerada[15]. Neste caso os líquidos usados tinham densidade de 1, aproximadamente. A comunicação n.º (14) descreve a aplicação de suspensões, soluções e lamas naturais, com densidade entre 0.75 e 3.00, para carregar modelos de depósitos. Este processo permite aumentar passo a passo a intensidade da carga sobre os modelos, conservando sempre a sua distribuição triangular. Deste modo, o modelo passa pelas fases de elasticidade linear, não linear e fissurada (16).

Apenas no caso relatado na comunicação n.º (4) foram aplicadas cargas de tipo térmico a um modelo. Neste caso tratava-se de gradientes térmicos constantes. Têm sido aplicadas a modelos de barragens variações cíclicas de temperatura nas faces, correspondentes às variações anuais. Podem ser utilizados nestes ensaios serpentinas de aquecimento e arrefecimento, correntes de ar, aquecimento localizado por irradiação, almofadas de resistência eléctrica, etc.

O ensaio de grandes modelos levanta novos problemas no que se refere às suas técnicas e condições de realização. Por se ter verificado serem as lajes resistentes as instalações mais versáteis para ensaio de grandes modelos, muitos laboratórios estão construindo instalações deste tipo com grande capacidade. Em 1968 realizou-se em Stuttgart um Simpósio RILEM sobre lajes resistentes. A comunicação n.º (7) apresenta uma análise sistemática de instalações deste tipo e do seu uso na aplicação de cargas a modelos de algumas estruturas típicas: vigas simples, pórticos, lajes, cascas, em betão armado e préesforçado. A comunicação assinala quais os valores da carga limite aplicável com a instalação descrita.

As cargas dinâmicas sobre modelos de estruturas de diferentes tipos podem ser produzidos por vários meios, tais como mesas vibradoras, vibradores mecânicos accionados por rotores excêntricos, cargas instantâneas, explosões, aparelhos hidráulicos com actuadores dinâmicos, vibradores electromagnéticos, etc. As mesas vibradoras mais simples, accionadas por aparelhos mecânicos ou por forças aplicadas cìclicamente por motores eléctricos de velocidade variável, são fáceis de instalar e utilizar. Com elas obtêm-se movimentos harmónicos aproximadamente sinusoidais. Nas comunicações apresentadas aparecem várias referências à utilização de mesas vibratórias.

Na comunicação n.º (2) descreve-se uma mesa vibratória para estudos sísmicos de modelos até 450 kgs (1000 lbs). Esta mesa produz vibrações apenas numa direcção horizontal. Este movimento pode ser diferente do movimento sinusoidal, amortecido ou não, que se obtém habitualmente com mesas vibratórias. Através de um sistema eléctrico-hidráulico de control esta mesa pode produzir tanto um movimento periódico como um movimento aleatório ou aperiódico. Bàsicamente trata-se de uma servo-válvula que regula o caudal de um líquido para o interior de um impulsionador hidráulico de acordo com um sinal eléctrico programado, que provoca o seu movimento, movimento

este que por sua vez é registado por um transformador diferencial que o compara com o sinal programado. No caso de se verificar haver diferenças entre estes dois sinais, a servo-válvula procede à correcção do caudal. Apesar do parâmetro de control ser deslocado, o programa aceita instruções sobre deslocamentos, velocidades ou acelerações, embora neste último caso o funcionamento da aparelhagem não ser ainda satisfatório (2). Seria de interesse avalizar as vantagens e limitações deste sistema em relação ao sistema de macacos hidráulicos. As mesas vibratórias capazes de produzir vibrações aleatórias são de grande interesse para o estudo sísmico de edifícios, muros de suporte, barragens de terra e betão e muitas outras estruturas.

Recentemente têm sido construídos simuladores de sismos, por meio de vibradores electromagnéticos, pneumáticos ou hidráulicos, com a finalidade de reproduzir com rigor acções sísmicas e outros efeitos dinâmicos. A Universidade da Califórnia tomou recentemente a iniciativa de estudar a construção de um grande simulador de sismos. A mesa vibratória teria dois movimentos horizontais ortogonais e um terceiro movimento vertical e teria capacidade para submeter estruturas com peso de 2 toneladas a acelerações de 2/3 g nas duas direcções horizontais, e 2/9 g na vertical. Está sendo considerada a hipótese de utilizar um grupo de impulsionadores hidráulicos com 52 elementos [17].

A excitação dos modelos pode ser feita por meio de instrumentos electromagnéticos. Fazendo variar a frequência da excitação pode produzir-se por modelo a ressonância natural dos vários modos. Também se pode obter a ressonância colocando impulsionadores mecânicos em diferentes pontos do modelo. Podem-se obter por este processo, as várias formas de onda, incluindo a sinusoidal, sendo a intensidade das forças aplicadas medida com aparelhagem electrónica.

A observação de que as forças aplicadas por impulsionadores não são proporcionais à aceleração sugere que a variação do amortecimento com a amplitude das vibrações é não linear. A interacção entre o impulsionador e o modelo é também problema com interesse (29).

A reprodução de cargas instantâneas tem sido objecto de investigação na engenharia civil. Têm sido utilizados sistemas pneumáticos cujo funcionamento se baseia na rotura súbita de uma membrana [18]. O equipamento hidráulico e hidropneumático construído para este efeito foi descrito na comunicação n.º 28, juntamente com alguns detalhes sobre o cálculo dos seus elementos.

Foram também referidos ensaios de fadiga em estruturas soldadas. Foi analisado o efeito do factor de escala assim como a influência da não-estacionaridade de cargas repetidas e das baixas temperaturas sobre a resistência à fadiga (25).

Um processo habitualmente seguido no estudo dos efeitos de sismos nos ensaios em modelo consiste em determinar em primeiro lugar as frequências naturais, os modos de vibração e o amortecimento do modelo e, em seguida, sujeitar este a acelerações aleatórias com densidade espectral de potência sucessivamente crescente para determinados intervalos de tempo, até se atingir um valor «standard». Para calcular a média dos valores máximos da resposta da estrutura o modelo é submetido a *dez* ensaios para cada valor da intensidade. O equipamento utilizado nestes ensaios consiste num gerador de impulsos aleatórios ou sinusoidais controlando um amplificador de potência cuja saída é alimentada por um vibrador electromagnético. O modelo está rìgidamente fixado a este vibrador. São usados extensómetros eléctricos associados a registadores electromecânicos (10).

Os parâmetros medidos podem ser deformações, forças, flechas, deslocamentos e rotações. A formação e desenvolvimento de fissuras é também de grande interesse. Considera-se que o modelo atingiu o colapso final quando os deslocamentos excedem certos valores ou quando se desagrega em pedaços.

Os aparelhos mais utilizados para a medição de deformações e determinação de tensões em modelo são os extensómetros eléctricos. Quase todas as comunicações apresentadas sobre este tópico referem a sua utilização. No caso de ensaio de modelos de materiais com pequeno módulo de elasticidade há que considerar cuidadosamente o problema da rigidez dos extensómetros. A comunicação n.º 31 descreve as técnicas e aparelhos estudados no Instituto de Engenharia Civil de Moscovo para a determinação da distorção, devida à rigidez dos extensómetros, que sofre o comportamento de materiais de baixo módulo de elasticidade quando submetidos a tensões uniaxiais e biaxiais. Nos ensaios

descritos nas várias comunicações foram usados, entre outros, extensómetros de Huggenberger e Wittemore, extensómetros pneumáticos tipo Solex, extensómetros semi-condutores, extensómetros de cordas vibrantes e outros que foram usados nos ensaios descritos nas comunicações. Para a medição de deslocamentos foram utilizados vibrógrafos, acelerómetros inductivos e oscilógrafos de canais múltiplos (17). Foram também descritos aparelhos foto-registadores (19). Normalmente são necessários instrumentos registadores, não apenas em ensaios dinâmicos mas também em ensaios à rotura. Estes instrumentos deverão ter a possibilidade de relacionar deformações, tensões, deslocamentos, largura de fendas ou outras grandezas observadas no modelo, com as cargas aplicadas e o tempo.

Está sendo estudada a hipótese de estabelecer ligações directas entre os extensómetros e computadores, para fornecimento de dados, medição e registo de deformações, cálculo automático das tensões principais no protótipo e seu registo. Um equipamento completo deste tipo foi já apresentado em 1965 [19]. Este equipamento pode reduzir de modo significativo o tempo e o esforço dispendidos com um ensaio.

7. FINALIDADES E CONCLUSÕES DOS ENSAIOS DESCRITOS NAS VÁRIAS COMUNICAÇÕES

7.1. Ensaios estáticos de elementos de betão préesforçado

Foi utilizado um modelo de uma estrutura complexa em betão armado — a fundação de uma torre de televisão com 190 m de altura — para o estudo das causas que levaram ao aparecimento de grande número de fendas nesta estrutura (3). Ensaios elásticos prévios em modelos a escala reduzida (1/50) permitiram explicar a acção das forças no estado elástico de tensões. Para compreender as causas do aparecimento de fendilhação e avaliar as condições de segurança estrutural, foi realizado um ensaio à rotura em grande modelo (escala 1/15). Este ensaio à rotura provou que a capacidade de carga da estrutura é igual ao triplo das cargas de serviço, embora a fendilhação tivesse surgido bastante cedo no modelo, como no protótipo. Estas fendas eram devidas à presença de grandes aberturas nas nervuras e à concentração das armaduras.

Também em França foram ensaiados vários modelos em microbetão armado numa tentativa para encontrar uma técnica de construção e ensaio de modelos de estruturas em betão armado (6). Foram feitos ensaios à tracção de barras embebidas em betão e ensaios sobre 100 modelos de vigas para a comparação da distância entre fendas com os valores observados nos protótipos. As cargas limite encontradas para os modelos eram normalmente superiores às encontradas nos protótipos. Observou-se semelhança nas deformações e as fendas apresentavam-se com as mesmas características mas eram mais numerosas nos protótipos[40].

7.2. Ensaios estáticos de elementos e estruturas em betão armado

Com vista ao estudo do grande invólucro do reactor Bugey em França foram construídos e ensaiados dois modelos à escala 1/5 (4). Foram usados, no betão, pares termoeléctricos e extensómetros de cordas vibrantes, nos cabos, dinamómetros, no ferro, extensómetros eléctricos além de outros aparelhos eléctricos.

O primeiro modelo foi ensaiado à pressão interna apenas para sete ciclos de carga e finalmente até à rotura. Estes ensaios demonstraram a completa reversibilidade do comportamento estrutural para pressões inferiores a 85 bares. O segundo modelo foi ensaiado à pressão interna e submetido a gradientes cíclicos de temperatura. Surgiram fendas na face interior. Obtiveram-se conclusões no que se refere à segurança do protótipo para as condições de serviço e à perda de préesforço durante os ciclos térmicos.

Realizaram-se ensaios finais com gradientes térmicos de $t = 100°C$ e pressões internas de 45 bares. Atingiu-se a rotura para este gradiente térmico e uma pressão interior de 137 bares. Considerou-se que a rotura tinha sido atingida quando o óleo que enchia o modelo do recipiente

começou a sair pelas fissuras. Nenhum dos cabos de préesforço cedeu, em qualquer dos modelos ensaiados. Observou-se uma boa concordância entre estes resultados e o cálculo teórico (4).

A comunicação n.° (5) descreve o ensaio em grande modelo (escala 1/4.64) de dois vãos de um viaduto em betão préesforçado com 5 vãos contínuos, para o estudo detalhado das tensões que se verificam na laje e em particular na vizinhança dos apoios. A estrutura é de certo modo complexa pelo facto da laje ser suportada por colunas esbeltas. O cálculo da laje pelos métodos habituais foi considerado pràticamente impossível. A estrutura estava sujeita a cargas verticais (peso próprio e sobrecarga) e a cargas devidas ao préesforço, tanto longitudinal como transversal, o que dava origem a efeitos de torção, em especial devido à assimetria das cargas. Era objectivo último dos ensaios a determinação da capacidade limite de resistência da estrutura em particular para a zona de ligação da laje às colunas. Os resultados dos ensaios provaram que o método de cálculo utilizado é aceitável mas demonstraram o interesse de algumas alterações ao projecto. Permitiram também confirmar os coeficientes de segurança e verificar que os seus valores não variavam muito para os vários elementos da estrutura: cerca de 4 em relação à fendilhação e 7, pelo menos, em relação ao colapso final da estrutura. O preço dos ensaios foi de cerca de 8 % do da construção (5).

Foram apresentados os resultados de ensaios de grande duração sobre modelos de vigas préesforçadas (8). Estes ensaios foram realizados para estudar o seu comportamento à rotura, os tipos de ancoragens, a importância das injecções de cimento, o desenvolvimento de fendas, a fricção dos cabos, assim como o seu comportamento ao longo do tempo, em especial a variação do préesforço ao longo dos anos. Foram relatados ensaios cuja duração foi de 20 anos (8).

Foram comparados, para uma viga em betão armado de 45,5 m de vão, os resultados obtidos em ensaios sobre modelo e os resultados do cálculo estrutural. Este processo permitiu verificar as hipóteses de cálculo para as cargas de serviço. Ficou demonstrado que o banzo superior não apresenta fendas e que o colapso final ocorre devido à rotura do cabo de préesforço e não à instabilidade da viga (11).

Um edifício de cinco andares construído com painéis pré-fabricados, em betão, foi ensaiado no Japão à escala natural num laboratório equipado especialmente para este efeito. A carga foi aplicada por 15 macacos. Com estes ensaios pretendeu-se racionalizar o cálculo estrutural de construções para habitação.

7.3. Ensaios estáticos sobre cascas em betão

A comunicação n.° (15) descreve as técnicas de ensaio usadas com três modelos de forma parabolóide hiperbólica a grande escala. As cargas uniformemente distribuídas foram simuladas por cargas pontuais usando pesos. As cargas concentradas foram também simuladas no modelo, assim como as operações de pós-tensão. Os ensaios foram realizados numa sala a temperatura constante (15).

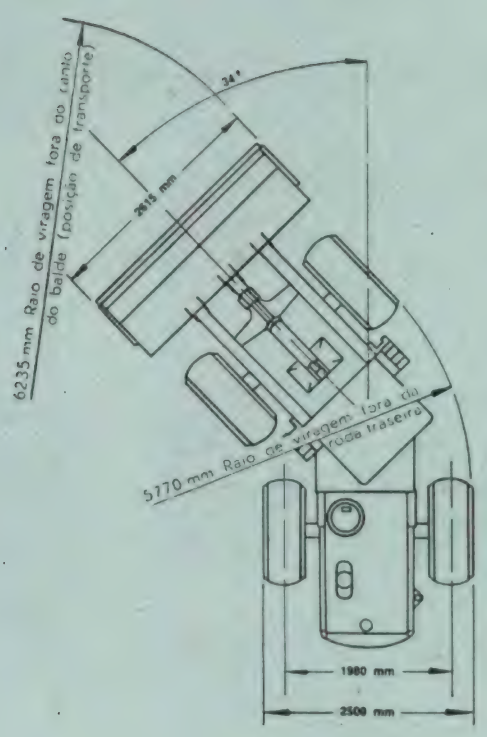
Modelos de estruturas cilíndricas préesforçadas, estruturas de forma parabolóide hiperbólica em betão armado e préesforçado e outras, em escalas variando entre 1/4 a 1/15 foram ensaiadas na Roménia. Obtiveram-se conclusões interessantes àcerca das formas das estruturas, do seu comportamento e do grau de aproximação dos métodos de cálculo utilizados (20).

Cascas contínuas, rectangulares em plano, de curvatura Gaussiana positiva foram estudadas em dois modelos no Instituto de Investigação de Betão Préesforçado de Moscovo para verificação dos métodos de cálculo analítico (22). A carga distribuída foi substituída por cargas concentradas em 256 pontos do modelo. Depois dos ensaios elásticos sem fendilhação os modelos foram ensaiados à rotura sob carga uniforme (22).

A comunicação n.° (24) apresenta vários exemplos de ensaios em modelo de cascas em betão.

Dois grandes modelos de cascas de dupla curvatura projectadas para cobertura de instalações industriais foram também ensaiados no Instituto Central de Investigação para Estruturas de Edifícios. Um dos modelos foi construído à escala 1/4 e o outro à escala 1/6 (30). O primeiro modelo era constituído por vinte lajes pré-fabricadas cujas juntas foram preenchidas com argamassa de cimento.

PAYLOADER H-65 C
ARTICULADA



A NOVA H-65 C, ARTICULADA, COM UM BALDE DE 3.500 LITROS PODE TRANSPORTAR 240 METROS CÚBICOS DE CARGA POR HORA ÚTIL NUMA ÁREA ONDE UMA MÁQUINA COM UM BALDE DE 1.500 LITROS NÃO SE PODERIA MOVIMENTAR — MAIOR RENDIMENTO EM MENOS QUILÓMETROS, UMA MÁQUINA COM GRANDE POTÊNCIA E CARACTERÍSTICAS IDEAIS PARA TRABALHOS EM ÁREAS LIMITADAS.

INTERNATIONAL HARVESTER

Fassio, L.DA

20, RUA JARDIM DO REGEDOR, 32
LISBOA, 2 — Telefones 36 19 02/3/4

DESPOEIRAGEM

FILTROS TECIDOS EM PEÇAS, PANOS, SACOS, MANGAS

DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52091 PBX
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
Tr. do Guarda Mór, 13-r/c
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
R. Francisco Newton, 389/393
C.P. 2178 - Tel. 81 89 7

MOÇAMBIQUE
L. Marques - C.P. 982 - Tel. 74 11 21
Beira - C.P. 1002 - Tel. 7 14 97

As lajes formando duas cascas adjacentes e as costelas em arco dos bordos foram reforçadas com arames de aço com diâmetro entre 1,34 e 8 mm. A única hipótese de carga considerada foi a carga uniformemente distribuída. O segundo modelo era uma casca monolítica em betão armado com dupla curvatura, fabricada com argamassa de cimento com 300 kg/cm2 de resistência à compressão. Este modelo foi também ensaiado com uma carga uniformemente distribuída (30). Os modelos foram ensaiados passo a passo até à rotura e os resultados foram comparados com os cálculos realizados por meio do método dos deslocamentos com base no método geral das variações de Vlassov (30).

7.4. Ensaios estáticos de elementos de materiais diversos

Foram ensaiados modelos à escala 1/2 de juntas centrais de um pórtico pré-fabricado em betão armado. Estas juntas eram constituídas por bandas em aço soldado. Segundo os seus autores, estes ensaios forneceram uma grande quantidade de dados qualitativos.

Foram ensaiados modelos de dois tipos diferentes de tanques de água construídos com elementos pré-fabricados e préesforçados pela carga (16). Um dos tanques era constituído por uma série de abóbadas cilíndricas pré-fabricadas colocadas verticalmente e sustentadas por colunas verticais em torno das quais foram colocados aros metálicos não submetidos a esforços, o que era conseguido colocando-os com o tanque sem carga. Uma vez o tanque cheio, estes aros foram envolvidos em cimento. O segundo tanque era idêntico ao primeiro, excepto no que se refere à forma dos segmentos pré-fabricados que eram agora abóbadas conoidais de secção inferior circular e superior rectilínea. Neste caso é mais fácil obter tanques tronco-cónicos, o que facilita a betonagem final em torno dos aros depois da entrada em carga. Carregando os modelos (construídos do mesmo modo que o protótipo) com líquido de densidade superior à da água (que produziu o préesforço) foi possível estudar o comportamento dos tanques quando surgem fissuras e fendas largas. Os estudos em modelo salientaram a vantagem de préesforçar os tanques enchendo-os com líquidos de densidade cerca de 25 % mais elevada que a água (16).

Ensaios em modelo de alvenarias de tijolo (18) mostram que a sua capacidade resistente e a sua rigidez se alteram durante o ensaio com o aparecimento de fendas. Isto vem confirmar a influência do reforço das alvenarias por vigas e colunas em betão armado. Esta influência é variável com a distância entre estes elementos de reforço. Foi verificado o seu efeito sobre as deformações de paredes em alvenaria. Foi observado que as deformações específicas das alvenarias dos modelos e protótipos eram idênticas. Uma vez que a relação entre esta deformação e a do betão é aproximadamente a mesma para modelos e protótipos é de crer que os resultados obtidos para os modelos são válidos. Este método de estudo das alvenarias em modelo torna possível realizar um grande número de ensaios. Vem também tornar possível o ensaio à rotura de modelos integrais de edifícios (18).

7.5 — Ensaios estáticos de estruturas metálicas

Foram utilizados no estudo ensaios elásticos de modelos de estruturas metálicas tridimensionais da cobertura de uma estação hidroeléctrica para verificação dos cálculos realizados. Este modelo foi também construído em aço à escala 1/10,85 (13). É possível nestes casos chegar fàcilmente a resultados de confiança por meio da análise matemática.

A comunicação n.º (21) descreve os ensaios em modelo de cinco estruturas metálicas tridimensionais distintas, bem como os métodos e técnicas utilizadas. Concluiu-se que certas estruturas não transmitem momentos de torção, o que permitiu corrigir o método de cálculo.

Na comunicação n.º (23) foram apresentados os ensaios em modelo reduzido e à escala natural de painéis e cascas tipo «sandwich» (3 camadas) submetidos a cargas de tipo estático e térmico. Conseguiu-se assim chegar a conclusões àcerca dos métodos de análise matemática deste tipo de estruturas.

7.6 — Ensaios dinâmicos de estruturas em betão préesforçado e aço

Uma «passerele» em betão préesforçado foi ensaiada em modelo para a determinação das suas características dinâmicas e comportamento até à rotura quando sujeita a vibrações. O problema das vibrações desagradáveis foi estudado tendo em consideração que a sensibilidade humana às vibrações horizontais é superior às verticais.

Foram tomadas em consideração famílias em «curvas de conforto» estudadas por outros autores. Um conjunto de curvas deste tipo foi assinalado nesta comunicação. Foram determinadas as frequências de resistência da «passerele». Foram estudados os meios para reduzir o amortecimento e a resposta da estrutura, nomeadamente apoios betuminosos (1).

Foi utilizada uma mesa vibratória de 1 tonelada para ensaiar modelos metálicos de estruturas aporticadas tridimensionais até ao aparecimento de rótulas plásticas (19). Foram então medidas as frequências naturais e o amortecimento. Verificou-se que o amortecimento tinha aumentado de 33 % e as frequências naturais decrescido de 20 a 25 % quando se atingiu o domínio elásto-plástico.

Realizaram-se ensaios de pequenos modelos metálicos até 60 kg com mesas vibratórias capazes de simular movimentos sísmicos. Na fase plástica final verificou-se um decréscimo na frequência da resposta até 50 % dos valores iniciais e um amortecimento de 10,7 %. Foram também determinados os valores destas grandezas durante as diferentes fases por que passa a estrutura, 12 perfis metálicos foram ensaiados por meio de um vibrador mecânico de 2,8 ton com frequências de 0 a 20 Hz e forças vibratórias até 20 (19). De ensaios de fadiga em estruturas metálicas soldadas (25) pode concluir-se que vários factores afectam o início e a propagação da fendilhação. Por exemplo, as baixas temperaturas afectam mais a propagação da fendilhação do que o seu início. Os ensaios mostraram que ao contrário do que sucede com as juntas simplesmente soldadas, as estruturas com soldaduras mais complicadas apresentam, a baixa temperatura, uma redução na resistência à fadiga.

7.7 — Ensaios dinâmicos de estruturas aporticadas, painéis e juntas

No INCERC na Roménia (17) foram ensaiados modelos à escala 1/4 de painéis pré-fabricados para a construção de edifícios resistentes a sismos.

A finalidade destes ensaios era a comparação do comportamento de painéis resistentes com diferentes tipos de juntas, com o comportamento de paredes e lajes monolíticas em betão armado quando sujeitas a cargas dinâmicas horizontais, e também a comparação do comportamento das diferentes juntas quando sujeitas a esforços cortantes de natureza estática. Nos ensaios estáticos de um pórtico metálico foi utilizado um macaco e nos ensaios dinâmicos foi utilizado um gerador de vibrações de massas excêntricas. O amortecimento verificado nas juntas era bastante elevado (17).

Os ensaios em modelo forneceram informações sobre os deslocamentos devidos à flexão e ao corte para edifícios de diferentes alturas (26) e à rotação e translação horizontais do terreno de fundação. Não se deve esquecer que os sismos violentos podem desenvolver forças e deslocamentos importantes nestas estruturas, as quais possuem elevada frequência natural. É necessário portanto que os edifícios possuam grande ductilidade, assim como é aconselhável que os seus primeiros andares sejam flexíveis. Ensaios sobre modelos tridimensionais de edifícios em betão armado de 3 a 12 andares foram realizados com uma mesa vibratória de 50 t de capacidade. Os resultados obtidos neste ensaio eram concordantes com os valores observados em ensaios dinâmicos da estrutura. Entre estes resultados incluem-se os períodos de vibração naturais, os coeficientes de aceleração horizontal e o aparecimento de fendas. Foram também ensaiados dinâmicamente modelos bidimensionais de diafragmas verticais e paredes transversais, tendo sido os resultados comparados com os do cálculo automático. Graças a ensaios estáticos sobre modelos foi possível analisar a redistribuição de tensões entre diafragmas verticais distintos. Os ensaios demonstraram a importância da boa execução das juntas topo a topo para a resistência a sismos de estruturas de paredes resistentes (26).

Na URSS foram ensaiados dois modelos de um edifício de 9 andares com estrutura em betão armado na mesa vibratória do Instituto Central de Investigação de Estruturas de Edifícios. Os modelos eram formados por três pórticos pré-fabricados em betão armado, ligados por vigas e lajes pré-fabricadas em betão armado. Transversalmente estes pórticos definiam dois vãos. Um dos modelos tinha um vão fechado por paredes laterais de betão armado. A ligação dos dois painéis fez-se por peças metálicas soldadas. As cargas verticais foram simuladas por pesos colocados sobre as lajes. Foram consideradas quatro fases nos ensaios, de acordo com o progresso da fendilhação. Na fase final deu-se a rotura da coluna. Foram apresentados dados referentes à variação do período de vibração natural como resultado da acumulação de destruições locais (27).

Foram apresentados exemplos de ensaios de acções sísmicas em modelos realizados em Portugal, que incluem barragens em betão e um edifício de 22 andares (10). Chegou-se a conclusões importantes àcerca do projecto de uma barragem. No que diz respeito ao edifício com os ensaios realizados procurou-se investigar a influência de fundações com diferentes características sobre o comportamento da estrutura sujeita a vibrações aleatórias, nomeadamente no que diz respeito à frequência, forma e coeficiente de amortecimento correspondentes aos três primeiros modos de vibração.

8. TÓPICOS PARA DISCUSSÃO

1. Considerando a grande capacidade dos computadores modernos e a possibilidade que hoje existe de resolução analítica de complicados problemas estruturais, qual é o interesse dos estudos em modelo?

2. Cargas que podem ser consideradas nestes estudos: peso próprio, tal como é aplicado progressivamente durante a construção, sobrecargas, pressão hidrostática, ventos, gradientes térmicos, variações cíclicas de temperatura, cargas dinâmicas, acções sísmicas, etc. Serão todas de interesse nos estudos em modelo?

3. Influência do factor de escala na semelhança das fendas no betão armado ou préesforçado. Influência da dimensão do inerte do microbetão, do diâmetro dos arames e outros detalhes. Influência sobre as condições de semelhança e na rotura, das tensões internas introduzidas durante a construção e presa dos ligantes e devidas às variações de temperatura e humidade.

4. Estruturas que devem ser analisadas em modelo. Necessidade do ensaio em modelo para o estudo de cubas ou invólucros de reactores, cascas, edifícios construídos com elementos pré-fabricados, etc.

5. Importância dos modelos para o estudo da acção dos sismos sobre as estruturas. Estudo do comportamento sísmico das alvenarias. Características estocásticas das acções sísmicas, critério de semelhança e factores de segurança.

6. Teorias de semelhança para a rotura. Definição de rotura. Critérios para a definição do factor de segurança a partir do ensaio em modelo de vários tipos de estruturas.

7. Técnicas de construção de modelos que permitam evitar o aparecimento de tensões internas indesejáveis.

8. Instrumentação e condições de ambiente para os ensaios, instrumentos de carga para grandes modelos, lajes resistentes. Aparelhagem para a reprodução de acções dinâmicas e sísmicas: vibradores, mesas vibratórias, impulsionadores electromagnéticos.

9. Novo equipamento de medição e registo. Uso dos computadores para a «cibernetização» dos ensaios em modelo.

9. AGRADECIMENTO

O autor agradece aos engenheiros A. Ravara e J. Pereira do LNEC a sua ajuda na preparação e correcção final deste relatório, assim como ao engenheiro Pedro Cunha Serra a sua colaboração na tradução para o português do texto original.

REFERÊNCIAS

1. Cardoso, Edgar — *Cálculo Experimental de Estruturas com Base na Análise de Modelos Reduzidos* — Edição do Autor. Lisboa 1968.

2. *Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels* — Intn. C. E. London 1968. Ver também Corum, J. M., White R. N. e Smith J. E. — *Mortar Models of Prestressed Concrete Pressure Vessels*, Proc. ASCE, Journal Struct. Div. ST2, Fev. 1969.

3. Fumagalli, E. — *Técnica e Materiali per la Modellazione delle Rocce de Fondazione di Sbarramenti Idraulici* — Giornale del Genio Civile — Fasc. 12, Dez. 1961.

4. Litle, W. — *Lessons on Theory and Use of Models* — M. I. T., Cambridge, Mass., 1962.

5. Serafim J. L. et all — *Determination of Termal Stresses in Arch Dams by Means of Models* — Bull. RILEM n.º 10, Março 1961.

6. Beaujoint, N. — *General Report of Session I* — Bull. RILEM n.º 7, Junho 1960.

7. Oberti, G. — *Large Scale Model Testing of Structures Outside the Elastic Limit* — Bull. RILEM n.º 7, Junho 1960.

8. Rocha, M. e J. L. Serafim — *Rupture Studies on Arch Dams by Means of Models*. Water Power, London, Vol. II (4), 1959.

9. Ritz, W. — Gesammelt Werke, Gautier — Villars, Paris, 1911.

10. Borges, J. F. — *Statistical Theories of Structural Similitude.* — Bull. RILEM n.º 7, Junho 1960.

11. Nazarov, A. — *On the Theory of Mechanical Similarity of Deformable Solids.* — Bull. RILEM n.º 7, Junho 1960.

12. Litle, W. and M. Paparoni — *Size Effects in Small Scale Models of Reinforced Concrete* — Journal ACI, Nov. 1961.

13. Fumagalli, E. — *Communication Sur les Matériaux pour Modèles Statiques des Barrages en Beton,* V Congresso das Grandes Barragens, C. 25, Paris 1655.

14. Breen, J. E. — *Fabrication and Tests of Structural Models* and Roll, F. — *Materials for Structural Models,* Proc. ASCE, Journal Struct. Div. ST6, Junho 1968.

15. Torroja, E. — *Etudes sur des Modèles Réduits des Structures Realisées au* «Laboratório Central (Madrid)» — *Réunion sur l'application des modèles,* Academia dei Lincei, Venezia, Out. 1955.

16. Ver comunicação do Simpósium RILEM de Madrid, em 1959 e dos VI e VII Congressos Internacionais das Grandes Barragens.

17. Penzien, J. et all — *Feasibility Study Large Earthquake Simulator Facility* — College of Engg. Univ. of Calif. Rep. n.º EERC-67-1, Set. 1967.

18. Biggs, J. M. e Hansen R. J. — *Model Techniques used in Structural Engineering Research* — Bull. RILEM n.º 10, Março 1961.

19. Serafim, J. L., P. J. Pahl e Z. M. Elias — *Effect of Foundation Movements on the Stresses in Arch Dams* — M. I. T. Dept. Civil Engg., Nov. 1965.

20. Wilson, E. L. e R. W. Clough — *Dynamic Response by Step-by-Step Matrix Analysis-Syposium on the Use of Computers in Civil Engineering,* Lisboa 1962.

LISTA DAS COMUNICAÇÕES APRESENTADAS

AUSTRÁLIA (1 comunicação)

1. Beresford, F. D. e R. E. Lewis — «Dynamic studies of a large model of a prestressed concrete footbridge» . . . . . .

CANADÁ (1 comunicação)

2. Ward, M. A. e R. V. Dawson: «A high force shake table for earthquarke simulation» . . . . . .

REPÚBLICA DEMOCRÁTICA ALEMÃ (1 comunicação)

3. Paul, F.: «Clarification to the problem of crack formation and carrying capacity of the foundation structure of a tower with the aid of a large-size model made out of fine grained concrete» . . . . .

FRANÇA (3 comunicações)

4. Launay, P.: «Étude, construction et essais des deux maquettes au 1/5-ème du caisson en béton précontraint de la centrale nucléaire de Bugey I» . . . . . .
5. Morancay, G.: «Essai sur modèle réduit en béton précontraint de deux travées d'un viaduc urbain»
6. Pommeret, M.: «Modèles en micro-beton armé» . . . . . .

REPÚBLICA FEDERAL ALEMÃ (1 comunicação)

7. Rostásy, F. S.: «Testing of large-size reinforced concrete models on stress-floors» . . . . . .

ITÁLIA (1 comunicação)

8. Rossetti, U. e P. Marro: «Étude de la variation de la précontrainte dans les temps par essais statiques sur grands modèles de poutres» . . . . . .

JAPÃO (1 comunicação)

9. Hisada, T. e Kameda: «Large-size structures testing Laboratory» . . . . . .

PORTUGAL (1 comunicação)

10. Pereira, J. e M. J. N. Priestley: «Materials and testing techniques for seismic model studies» . . . . .

ROMÉNIA (11 comunicações)

11. Avram, C., D. Anastasescu e I. Gruñer: «Étude d'une poutre maitraisse en béton précontraint pour la toiture d'une salle de sports» . . . . . .
12. Boleantu, L., M. Fischer e T. Babeu: «Quelques particularités des essais de résistance sur les modèles des éléments avec dimensions reduites» . . . . . .
13. Mateescu, D., I. Appeltauer, D. Porumb e F. Regep: «L'essai de la maquette du toit de la centrale hydroélectriqne des Portes de Fer» . . . . . .
14. Minhailescu, M., T. Onet e A. Ionescu: «Testing technique of a joint of precast reinforced concrete frame» . . . . . .
15. Minhailescu, M., A. Pocanschi, C. Bia e I. Horvath: «Testing methodology of some hyperbolic paraboloid shell models» . . . . . .
16. Mihul, A. e R. Grigorescu: «Procédé d'essai à charges statiques variables do quelques modèles de réservoirs» . . . . . .
17. Niculescu, D. D., I. Brinzan e F. Alexandrescu: «Sur les méthodes utilisées par l'INCERC aux essais statistiques et dynamiques effectués sur des modèles de contreventements en grands panneaux, assemblés par différents types de joints de résistance» . . . . . .
18. Simonici, M., Cr. Schleifer, El. Loghin e S. Follas: «Recherches sur modèles, concernant le comportement des maçonneries sous l'action des charges horizontales» . . . . . .
19. Strat, L., C. Mihai e M. Manolovic: «Investigation methods of steel models subjected to dynamic loads in elastroplastic range» . . . . . .
20. Ungureanu, I.: «Méthodologie et technique des essais sur modèles en mortier de ciment pour l'étude des structures en béton armé et béton précontraint» . . . . . .
21. Ungureanu, I.: «Méthodologie et technique des essais sur modèles metalliques pour l'étude des structures apatials» . . . . . .

U. R. S. S. (10 comunicações)

22. Chinenkov, J. V. e M. B. Krakovsky: «The reinforced concrete models used to study stress in shallow shells of positive curvature» . . . . . .
23. Gohberg, J., S. B. Yermolov, J. N. Potapov e S. M. Shinkariova: «Experimental study of models and natural scale sandwich structures» . . . . . .
24. Khaidukov, G. K. e V. V. Shugaev: «The methods for testing models of concrete thin-walled shell structures» . . . . . .
25. Kobrin, M. M., A. S. Rezchikov, J. Vargas e A. A. Titov: «Method of fatigue tests on welded natural scale structures taking into account scale factor, unstationary and service load and influence of low temperatures» . . . . . .
26. Poliakov, S. V., B. E. Denisov, V. J Konovodchenko, A. V. Cherkashin e R. A. Kuliev: «Natural scale and model investigations of seismic stability of large panel buildings» . . . . . .
27. Polyakof, S. V., J. M. Eisenberg e V. K. Papelishvily: «Study of earthquake resistance of frame panel and frame buildings on large-scale models up to failure» . . . . . .
28. Tyablikov, J. E.: «Modeling on sudden loads for test of fullsize and large-scale speciments» . . . . .
29. Tyablikov, J. E. e V. V. Karamishkin: «On stability of the excitation of the oscillation by the rotor hydraulic pulsators in the resonance zone of the specimen» . . . . . .
30. Vasilkov, B. S. e V. G. Vlasov: «Experimental investigations of reinforced concrete shell roofing structures on medium size models made of reinforced cement mortar» . . . . . .
31. Zlochevsky, A. B.: «Methods of electric tensiometry for low modulus materials» . . . . . .

FEIRAS, CONFERÊNCIAS, EXPOSIÇÕES E CURSOS NO MUNDO

OBJECTIVO E PROGRAMA	LOCAL, DATAS, ORGANIZAÇÃO, INFORMAÇÕES
Conferência Internacional «Física dos Polímeros 1971»	Leipzig (RDA) 30 Agosto — 1 Setembro-71
Colóquio Sobre as Estruturas Submarinas	Honolulu, 30 Agosto — 2 Setembro-71 I.A.S.S. — Technological Unuiversity, Oostplantsoen 25, Delft, Holanda
Feira Internacional de Controle da Poluição do Ar e da Luta Contra o Ruído Temas das Conferências: 1. Poluição Atmosférica Regional 2. Poluição Atmosférica na Indústria Florestal 3. Problemas das Fábricas com Energia Nuclear 4. Barulho Industrial 5. Problemas Ambientais na Indústria 6. Medidas de Poluição Atmosférica 7. Poluição Atmosférica nas Indústrias do Ferro e do Aço 8. Ruído de Tráfego, Poluição Atmosférica e Planeamento Urbano	Jönköping, Suécia, 1-7 Setembro-71 Elmia AB, Box 6066, 55006, Jönköping, 6 Suécia, Telex 70164
Feira Internacional de Estrasburgo	Estrasburgo, 2-13 Setembro-71 Fundo de Fomento de Exportação
IASS Symposium on Submarine Shells	Honolulu, 2-6 Setembro-71 IASS, Alphonso XII, 3, Madrid 7, Spain
Feira Internacional de Budapeste	Budapeste, 3-13 Setembro-71 F.F.E.
Salão Internacional da Rádio-Televisão e Electro-Acústica	Paris, 4-13 Setembro-71
Feira de Leipzig	Leipzig (RDA) 5-12 Setembro-71
Feira das Construções Mecânicas	Brno (Checoslováquia) 4-13 Setembro-71
III Conferência Internacional das Mulheres Técnicas e Cientistas (Tilwes)	Turim, 5-12 Setembro-71,
First International Conference on the Pneumatic Transport of Solids in Pipes: Pneumotransport — 1	Cambridge, 6-8 Setembro-71 H. S. Stephens, Pneumotransport — 1, British Hydromechanics Research Association Cranfield, Bedford (Grã-Bretanha)
7.º Congresso Internacional de Forja por Estampagem	Bruxelas, 6-10 Setembro-71 S.I.F.E., Asociación para el Progreso de la Dirección Montalban, 3, Madrid, Espanha

é vasto o nosso campo de acção

6 DELEGAÇÕES NA METRÓPOLE E ULTRAMAR

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

LISNAVE — Estaleiro da Margueira — Doca n.º 10.

OBRAS PÚBLICAS
CONSTRUÇÃO CIVIL—INDUSTRIAL E URBANA

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA • FUNDAÇÕES ESPECIAIS • CONSOLIDAÇÕES
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS • PONTES E VIADUTOS • SILOS E CHAMINÉS
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

é vasto o nosso campo de acção

6 DELEGAÇÕES NA METRÓPOLE E ULTRAMAR

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

MOAGEM DA BEIRA - MOBEIRA — Moçambique — Cidade da Beira — Construção de oito células cilíndricas com diâmetro interior de 7 metros e altura de 26,5 metros (moldes deslizantes).

OBRAS PÚBLICAS
CONSTRUÇÃO CIVIL—INDUSTRIAL E URBANA

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA • FUNDAÇÕES ESPECIAIS • CONSOLIDAÇÕES
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS • PONTES E VIADUTOS • SILOS E CHAMINÉS
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

C. D. U. 624.6 : 539.389.3
624.35 : 539.389.3

CREEP EFFECTS IN SOME ARCH AND CANTILEVER BRIDGES (1)

by J. FERRY BORGES, *
J. MARÉCOS ** and
J. TEIXEIRA TRIGO ***
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon

RESUMO

Descrevem-se as técnicas seguidas no LNEC para a medição de tensões e extensões em obras de betão armado e pré-esforçado.

Apresentam-se sumàriamente os resultados de ensaios de fluência conduzidos na Ponte do Abreiro, na Ponte da Arrábida e nos viadutos da Ponte Salazar.

Chama-se particularmente a atenção para a vantagem de conduzir os ensaios de fluência, na própria obra, mediante a utilização de extensómetros controlados.

SYNOPSIS

The techniques followed at LNEC, Lisbon, for the in situ measurement of strains and stresses in reinforced concrete structures are briefly described.

The results of creep tests performed in three bridges are presented and interpreted.

Attention is called to the advantages of performing creep tests in the bridges using controlled gauges.

1 — INTRODUCTION

The techniques followed by the Laboratório Nacional de Engenharia Civil for the observation of structures, mainly bridges and dams, have been published at several instances (1 to 6). The present paper simply calls the attention to the techniques used for the measurement of strains and stresses, particularly taking into account the effects of creep.

For the accurate measurement of strains and stresses in reinforced and prestressed concrete structures accoustic strain gauges embedded in the concrete are used. These strain gauges have cylindrical body and heads and total lengths varying between 21 and 34 cm. They yield accuracies of the order of 5×10^{-6}. (4)

When measuring strains the main difficulty consists in distinguishing the part due to stresses from the part due to shrinkage and temperature. Also the evolution of the mechanical properties with time — creep effect — is in general difficult to follow and to interpret. In order to overcome this difficulty the strain gauges are embedded in the structure at three different conditions: i) active gauges, ii) compensating gauges and iii) controlled gauges, fig. 1.

The active gauges measure the total strains in the structure. The compensating gauges are intro-

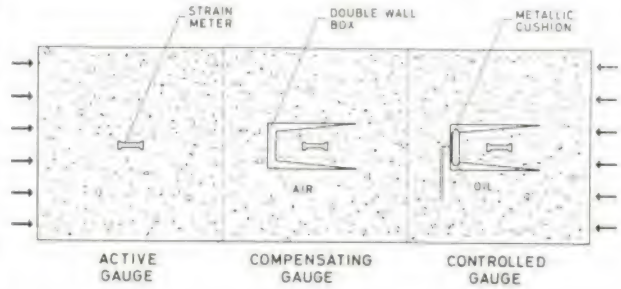


Fig. 1

(1) Paper presented to the 1970 Madrid Symposium on Design of Concrete Structures for Creep, Shrinkage and Temperature Changes, of the International Association for Bridge and Structural Engineering.

* Civil Engineer, Associate Director.

** Civil Engineer, Research Officer of the Buildings and Bridges Department, Head of the Observation of Structures Division.

*** Civil Engineer, Research Officer of the Buildings and Bridges Department.

Received December 4 th, 1970

duced inside double wall cylindrical boxes, built of thin copper sheet. Thus they are subtracted from the action of stresses. The controlled gauges are also inserted into similar double wall cylindrical boxes. However metallic cushions filled with oil placed at the top of the boxes allow to apply known stresses on the concrete cylinders where the strain gauges are embedded. By controlling the pressure of the oil in the cushion, mechanical tests of the concrete inside the structure, particularly creep tests, can be performed.

By the simultaneous use of an active and a controlled gauge it is even possible to perform a direct measurement of stresses, not involving the knowledge of the mechanical properties of the concrete. In fact, if the pressure of the oil in the cushion is varied in such a way the strains indicated by both the active and the controlled gauges are permanently equal, the pressure applied corresponds without further corrections to the existing stresses.

In practice instead of varying the pressure on the controlled gauge it is preferable to apply a constant pressure, which corresponds to performing a creep test. This procedure, as compared with the usual technique of performing creep tests in the laboratory, has the great advantage that a very close similitude between the conditions around the active and the controlled gauge is automatically obtained. In this way, the creep corrections to be introduced in the active gauges can be very accurately computed. Thus the overal accuracy of the results is great, as shall be seen.

In order to reach this high accuracy, the thermal and hygrometric conditions around the controlled gauges must be as similar as possible. Consequently, in the case of structures formed by walls, the cylindrical boxes indicated above are substituted by simple thermal and hygrometric insulations, as indicated in fig. 2.

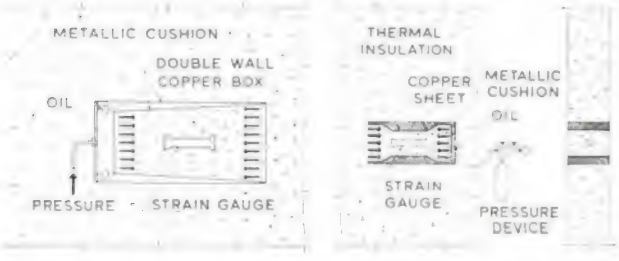


Fig. 2

2 — RESULTS OF TESTS

Figs. 3 to 5 show the results of creep tests performed in three bridges: two arch bridges and a prestressed cantilever bridge. These creep tests refer to controlled gauges and were run during periods varying from 500 to 2000 days.

The creep tests at Abreiro bridge were performed from 1956 to 1958, during 900 days, by applying a constant stress of 45 kgf/cm^2, fig. 3.

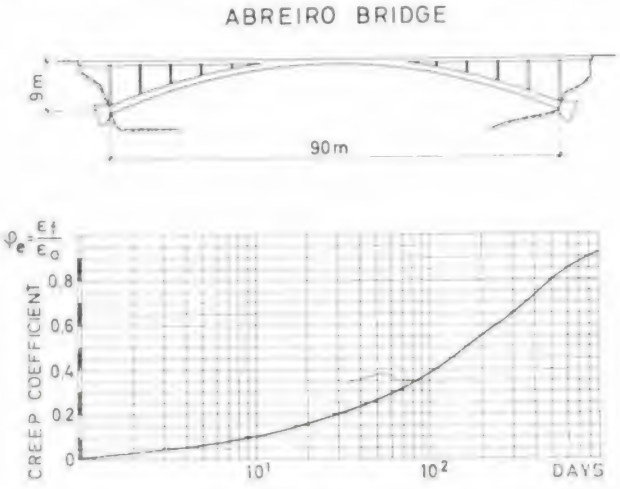


Fig. 3

The creep tests at Arrabida bridge were performed in 1962 and 1963, during 500 days, by applying a constant stress of 80 kgf/cm^2, fig. 4. The measurement of strains and displacements is still being continued at the present date. However the creep tests were discontinued

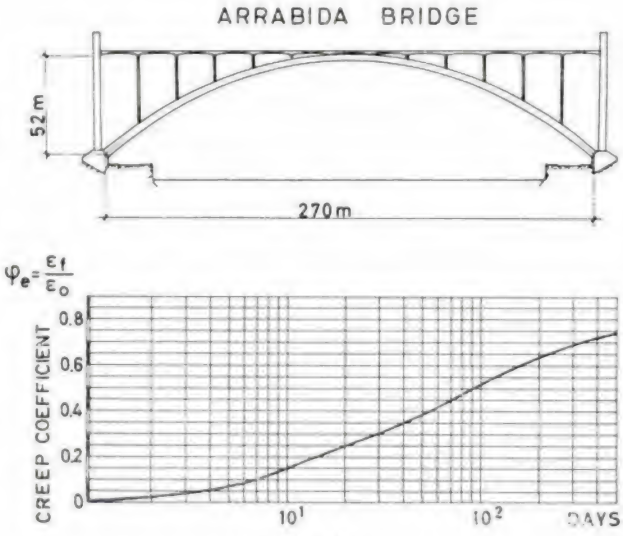


Fig. 4

in 1963 due to rupture of the metallic cushions of the controlled gauges.

The creep tests at the north viaduct of the Tagus River bridge started in 1964 and are still in progress. The results presented refer to a period of about 2000 days. The stress applied is 100 kgf/cm², fig. 5.

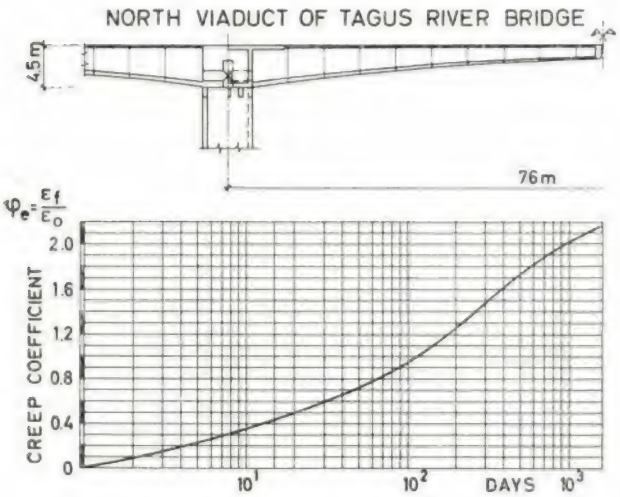


Fig. 5

Fig. 6 indicates the results obtained by a group of strain gauges at section S of one arch of Arrabida Bridge. As can be seen the creep test was performed at a stress near to the one due to the applied loads.

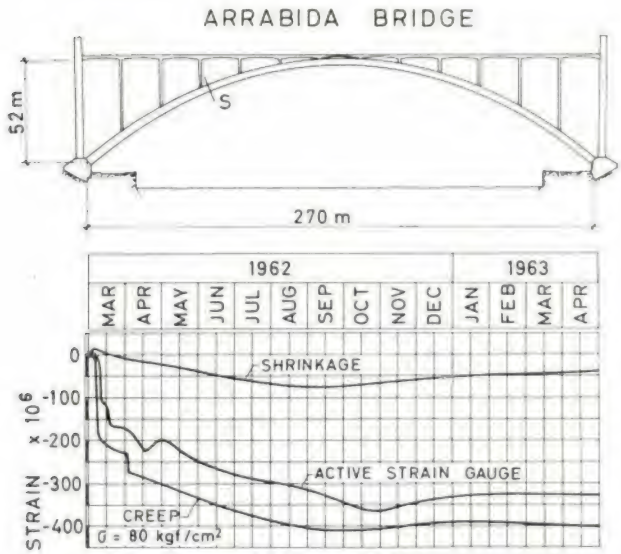


Fig. 6

The diagrams of the evolution of strains, shrinkage and creep in the prestressed viaducts of the Tagus River bridge are presented in (6).

Table I indicates for the different bridges: the mean value of the resistance of the concrete at 28 days, obtained by testing 20 cm cubes; the instantaneous modulus of elasticity; the creep coefficient corresponding to 500 days, φ_e; and the 500 days modulus of elasticity, obtained by dividing the instantaneous modulus of elasticity by $1 + \varphi_e$.

The creep coefficient relates the strains due to creep ε_f, with the instantaneous ones due to the applied stress, ε_o. Linear creep is thus assumed.

The number of compression tests performed, from which the indicated mean values were computed, varied from about 20 in the case of Abreiro bridge to several hundred in the case of Arrabida bridge.

It is interesting to compare the results presented in Table I with those that would be obtained by using the expressions recommended by FIP-CEB (7).

Assuming that the experimental modulus of elasticity, E_e, corresponds to the secant modulus, E_s, as defined by FIP-CEB, R12,222 and that this last one is 10 % lower than the tangent modulus, E_t; adopting expression

$$E_t = 21\,000 \sqrt{R'_b}$$

where R'_b is the resistance in cylinders expressed in kgf/cm²; and further taking this resistance as 0.85 of the resistance in cubes R'_{bc}; it comes

$$E_s = 0.9 \times 21\,000 \sqrt{0.85\, R'_{bc}} = 17500 \sqrt{R'_{bc}}$$

The values of E_e, E_s and E_s/E_e are indicated in Table II.

For Arrabida and Tagus River bridges the computed values differ respectively plus and minus 8 % from the experimental ones. In case of Abreiro bridge the computed value is 36 % higher than the experimental one. It must be referred that in this case the modulus of elasticity considerably increased in time and reached the mean value of 2.7×10^5 kgf/cm² at the age of 300 days.

As regards creep, FIP-CEB Recommendations give the creep coefficient φ_t by the product of 5 coefficients

$$\varphi_t = k_c\ k_d\ k_b\ k_e\ k_t$$

which, respectively, consider

k_c — relative humidity of the air
k_d — age at loading
k_b — amount of cement and water/cement ratio
k_e — fictitious thickness
k_t — time and fictious thickness.

For the cases under consideration these coefficients take values indicated in table II and lead to the values φ_t also indicated in the same table. The agreement between computed and measured values is very good for Arrabida and Tagus River bridges and poor for Abreiro bridge. Attention is called to the fact that in this case coefficient k_t (influence of time) takes a very low value due to the great thickness of the arch, about 100 cm.

In all the cases, the stresses at different sections of the bridges were computed by using the results of the active gauges, duly compensated by the controlled gauges.

In Abreiro bridge, the accuracy with which it was possible to compute the stresses was fairly good. However, due to technique improvements this accuracy was considerably increased in Arrabida and Tagus River bridges.

For instance, in the case of Arrabida bridge the axial forces computed from the measured stresses satisfy the conditions of equilibrium with a mean error of 2% and maximum errors of about 4%. In this bridge a total of 214 gauges were used to determine stresses at 8 sections. It is interesting to note that due to creep there was an important evolution of the bending moments in the sections of the arches. The evolution in time of the displacements agrees with the measured evolution of strains.

As is well known, creep effects are very important in cantilever prestressed concrete bridges. The measurements performed at the Tagus River bridge allowed an understanding of the general behaviour of the structure and contributed to an accurate forecasting of the evolution of the cantilever displacements in time.

3 — CONCLUSIONS

For studying the behaviour of reinforced and prestressed concrete structures accurate measurement of strains and stresses is needed. The measurement of stresses is particularly difficult due to creep effects.

Thus, for the observation of structures, the simultaneous use of active, compensating, and controlled gauges is advisable, the last ones allowing to perform compression tests, in the structure, in just the same conditions as those under which the other gauges are operating.

The results on creep obtained at Arrabida arch bridge and at the prestressed cantilever viaduct of Tagus River bridge agree closely with the creep expression presented at the «FIP-CEB Recommendations». For Abreiro bridge the agreement is much worse.

In these three bridges the measurement of stresses was performed along several years with high accuracy. The verification of equilibrium conditions allowed to check this accuracy.

TABLE I

Bridge	28 days mean resistance R_{bc} (kgf/cm²)	Instantaneous modulus of elasticity E_e (kgf/cm²)	500 days creep coefficient φ_e —	500 days modulus of elasticity E_{500} (kgf/cm²)
Abreiro	$3.0\ 10^2$	$2.2\ 10^5$	0.80	$1.2\ 10^5$
Arrabida	$5.6\ 10^2$	$3.8\ 10^5$	0.75	$2.2\ 10^5$
Tagus River . . .	$3.9\ 10^2$	$3.7\ 10^5$	1.72	$1.4\ 10^5$

TABLE II

Bridge	Modulus of elasticity			Creep coefficient		
	Measured E_e (kgf/cm²)	Computed E_s (kgf/cm²)	Computed / Measured E_s/E_e —	Measured φ_e —	Computed $k_c\, k_d\, k_b\, k_e\, k_t = \varphi_t$ —	Computed / Measured φ_t/φ_e —
Abreiro	$2.2\ 10^5$	$3.0\ 10^5$	1.36	0.80	$2.3 \times 0.8 \times 1.0 \times 0.7 \times 0.2 = 0.3$	0.4
Arrabida	$3.8\ 10^5$	$4.1\ 10^5$	1.08	0.75	$2.1 \times 0.7 \times 0.9 \times 0.75 \times 0.7 = 0\ 7$	0.93
Tagus River	$3.7\ 10^5$	$3.4\ 10^5$	0.92	1.72	$2.3 \times 1.0 \times 1.4 \times 0.75 \times 0.7 = 1.7$	0.98

REFERENCES

1 — ROCHA, M.; BORGES, J. FERRY; MARÉCOS, J — Observation of some reinforced concrete structures — RILEM Symposium on the Observation of Structures, Lisbon, 1955.

2 — ROCHA, M.; BORGES, J. FERRY; SERAFIM, J, L. General report, RILEM Symposium on the Observation of Structures, Lisbon, 1955.

3 — ROCHA, M,; SILVEIRA, A. F. — Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams, 8th Congress on Large Dams, Edinburgh, 1954.

4 — ROCHA, M. — In situ strain and stress measurements, paper included in «Recent developments in numerical and experimental methods» edited be Zienkiewicz–Holister, Swansea, 1965.

5 — BORGES, J. FERRY and MARÉCOS, J. — Bridge Observations in Portugal, Proceedings of the Conference on Experimental Methods of Investigating, Stress and Strain in Structures, Praha, October, 1965.

6 — MARÉCOS, J., CASTANHETA, M. and TRIGO J. T. — Field observation of Tagus River suspension bridge, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST4, April, 1969.

7 — COMITÊ EUROPÉEN DU BÉTON – FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE, Recommandations Internationales pour le Calcul et l'Exécution des Ouvrages en Béton, Seconde Édition, Juin, 1970.

FEIRAS, CONFERÊNCIAS, EXPOSIÇÕES E CURSOS NO MUNDO

OBJECTIVO E PROGRAMA	LOCAL, DATAS, ORGANIZAÇÃO, INFORMAÇÕES
4.ª Conférence Internationale sur L'Utilisation de L'Énergie Atomique à des Fins Pacifiques	Genève, 6-16 Setembro-71 AIEA Kärntnerring 11, Vienna, P. O. Box 390, A-1011, Áustria
Reunião da Comissão Permanente da RILEM	Buenos Aires, 8-9 Setembro-71 RILEM, 12, Rue Brancion, Paris VX, França
XVII Congresso da C I E — Comission Internationale de l'Eclairage	Barcelona, 8-15 de Setembro-71 Informações: Comissão Nacional Portuguesa de Iluminação Rua Marquês da Fronteira, 115, 5.º Esq., Lisboa-1
17.º Salão da Electrónica	Amesterdão, 10-19 Setembro-71
PRAGOTHERM — 71 Exposição do Aquecimento e do Ar Condicionado	Praga (Checoslováquia), 11-18 Setembro-71
XI V Congresso Mundial Sobre Estradas	Praga, 12 Setembro-71 Secretary of Piarc, 43, Av. Prèsidente-Wilson, Paris — XVIème, França
14 th PIARC (Permanent International Association of Road Congress) World Road Congress	Praga, 13 Setembro-71 PIARC, 43, Av. du Prèsident Wilson, Paris 16ème, France
Simpósio Sobre Contagem por Cintilação Líquida	Londres, 13-16 Setembro-71 Radiochemical Methods Groups Society for Analytical Chemistry 9-10, Savile Row, London, W1 X . 1A F
Rilem Symposium on the Experimental Analysis of the Problems of Instability in Full Scale and in Scole Model	Buenos Aires, 13-17 Setembro-71 Rilem, 12, R. Brancion, Paris 15, França
Simpósio Sobre a Dinâmica dos Gases Ionisados	Tóquio, 13-18 Setembro-71 M. Prof. P. Germain, Fac. des Sciences de Paris, Tour 66, 9, Quai Saint-Bernard, Paris 5ᵉ, França
II Simpósio INT Sobre Biodeterioração	Lunteren, Holanda, 13-18 Setembro-71 2nd Int. Biod. Symposium, c/o Holland Organizing Centre, 16, Lange Voorhout, THE HAGUE (Holanda)
Salão Internacional da Técnica de Laboratório, da Técnica de Medida, da Eng.ª Química e da Automação em Química	Basileia, 13-18 Setembro-71 Basileia, halles de la Foire Suisse d'Échantillons — Bâle — Suisse Org: Assoc. Suisse des Chimistes
INTERBAU — 25.ª Exposição Internacional de Máquinas Para a Indústria de Cerveja e Outras Bebidas	Munique, 13-18 Setembro-71

U. D. C. 551.508.5 : 532.52

VI — THE APPLICATION OF HOT-WIRE ANEMOMETERS IN LOW AND HIGHLY TURBULENT FLOWS

by F. DURST

Mechanical Engineering Department
Imperial College of Science and Technology
London / England

RESUMO

Neste artigo sumarizam-se as aplicações do anemómetro de fio quente, quando utilizado em escoamentos turbulentos.

Em particular estudam-se correcções de segunda e terceira ordem, no caso de escoamentos altamente turbulentos.

Apresenta-se o método de tratamento dos dados fornecido pelo anemómetro, baseado na medida da densidade de probabilidade, e ainda um novo método desenvolvido pelo autor.

SYNOPSIS

The following paper is a short sumary of the application of hot wire anemometers for investigations of flow with low and high turbulence intensities. The basic equations are derived for conventional evaluation procedures, and their application to measurements in flow regions of low turbulence intensities are discussed. The extensions of these methods, by second and third order corrections, to flow investigations in regions of high turbulence are considered and their limitations are shown.

An evaluation method based on probability density measurements of hot-wire anemometer output signals is discussed. The validity of the assumptions of this method are considered and a sumary of investigations into their feasibility is given.

An outline of a new evaluation method is presented, that has been developed by the author and is presently being tested in different flow situations. This method has no severe turbulence intensity restrictions and should therefore allow an extension of hot-wire anemometry to flows with high turbulence intensities.

1) INTRODUCTION

Quantitative investigations of turbulent flows have so far been entirely restricted to measurements by means of hot-wire anemometry. This measuring technique has been superior to other methods, although its limitations have been known for many years, see [1]. It is only recently that rapid developments in optical anemometry have led to a new measuring technique that is superior, in many respects, to hot-wire anemometry, see [2], [3], [4]. The author is convinced, however, that the application of hot-wire techniques will continue until the development of optical anemometers is complete. Hence, improvements in their application are still worthwhile.

The present paper is an introduction to the application of hot wire anemometers in low and highly turbulent flows. It is demonstrated that accurate experimental investigations by means of hot-wire anemometry have so far been entirely restricted to flows whit low turbulence intensities. Furthermore, the derivations below indicate, why research into highly turbulent flows, that occur very frequently in industry, e.g. see Figure 1, was considerably hampered by turbulence intensity limitations of conventional evaluation methods. It is shown below that these restrictions are a direct consequence of neglecting higher order terms in series expansions of the square root of velocity components which occur in the evaluation equations. The limitations of these conventional evaluation methods are shown

Received May 30 th 1971.

and their improvements by first, second and higher order corrections are discussed.

The present paper also considers an evaluation technique for hot wire anemometer signals that is based on amplitude probability density measu-

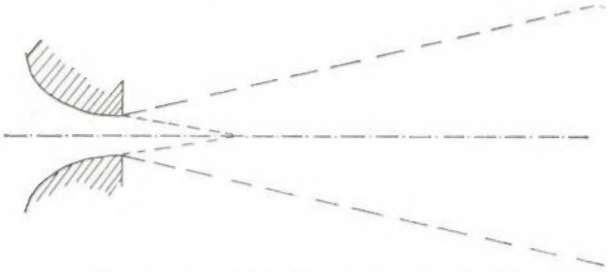


Figure 1-a: High Turbulence in Jet-Flows

Figure 1-b: High Turbulence in Wall Boundary Layer Flows

Figure 1-c: High Turbulence in Separated Flows

rements. This method is based on assumed normal probability density distributions for the fluctuating velocity components. The validity of these assumptions is discussed and the limitations of the method are given.

The outline of a new evalution method is presented, which has been developed by the author and is presently being tested in different flow situations. This method does not employ series expansions in the equations used to evaluate turbulence intensities and shear stress and, therefore, does not have the severe restrictions to low turbulence intensities of conventional evaluation techniques. The general evaluation equations are derived for measurements of mean velocity components, turbulence intensities and shear stress. This equation represents a relationship between measurable electrical signals and the mean and fluctuating velocity components at a point in the flow field. Hence, the latter can be computed from these equations.

The author hopes that the present paper will be a useful guide to the application of hot-wire anemometers for investigations of turbulent flows. He also hopes that the suggestion of a new evaluation procedure will lead to hot-wire anemometer investigations of highly turbulent flows.

2) EFFECTIVE COOLING VELOCITY OF HOT-WIRE

Turbulence investigations by means of hot-wire anemometry require accurate knowledge of the directional sensitivity of hot-wires. This can be obtained by direct calibration in a low turbulent flow with known flow direction relative to the hot-wire. Such a calibration will lead to the required velocity and angle response curves, see Figure 2. However, this information is insufficient if the hot-wire is applied to turbulent flow fields, where the instantaneous velocity vector is continuously changing its angle relative to the hot-wire. In such flow cases, the calibration data have to be expressed analytically to be able to handle them within the evaluation equations. This is done mostly by introducing an effective cooling velocity as a function of the velocity components perpendicular and parallel to the wire.

$$\hat{U}^2_{eff} = F\left(\hat{U}^2_{per}, \hat{U}^2_{par}\right) \qquad (1)$$

There have been several proposals for analytic expressions for the effective colling velocity some of which are given by Champagne and Sleicher [4]. In the present paper the effective cooling velocity is expressed in the following form.

$$\hat{U}^2_{eff} = \hat{U}^2_{per} + k^2 \hat{U}^2_{par} \qquad (2)$$

This form has been used before by many research workers, e.g. Hinze [1], Webster [6], Champagne and Sleicher [5], Kjellstrom and Hedberg [7], Durst [8], etc., and was found to give satisfactory agreement with calibration data.

In equation (2) the effective cooling velocity has been given in terms of velocity components relative to the wire. However, the velocity components of interest are not those relative to the hot-wire but those relative to a fixed coordinate

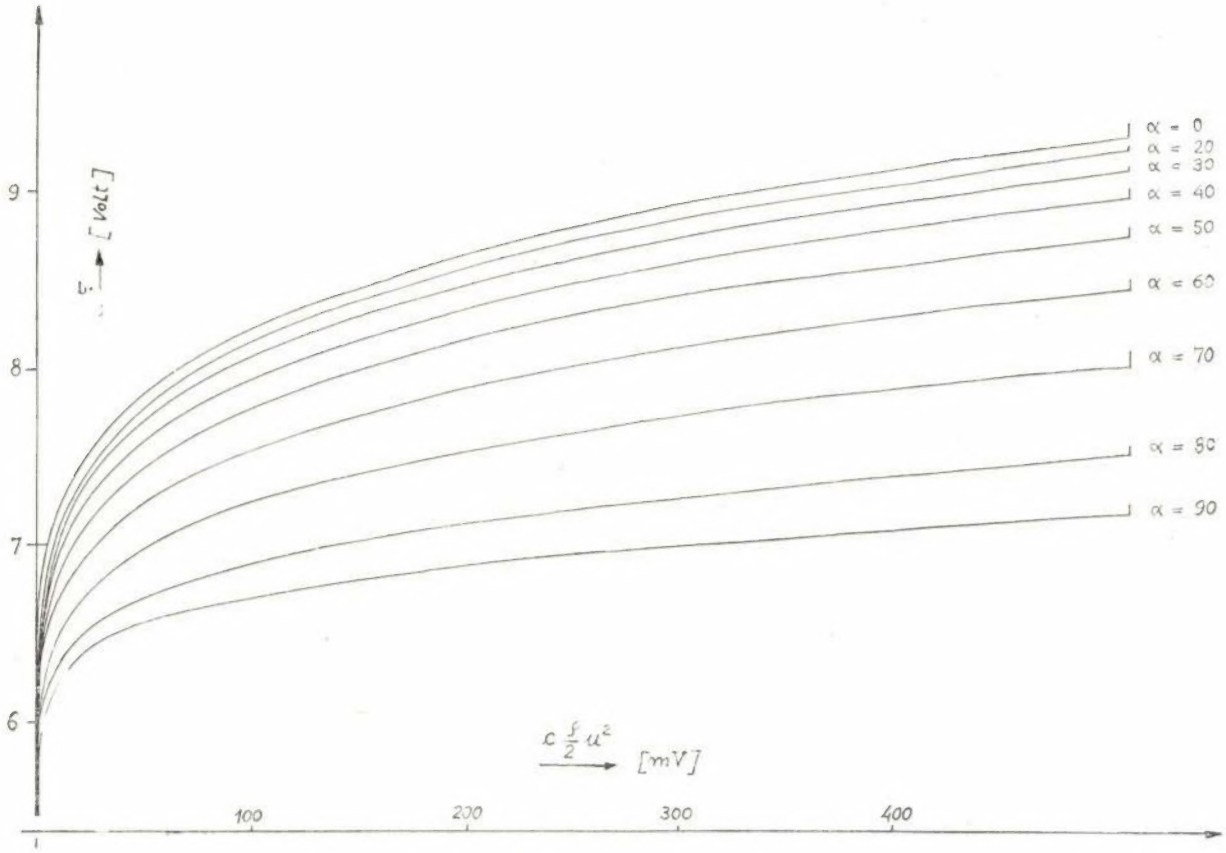


Figure 2: Calibration curves for hot-wire

system x_i. This requires the velocity components $\hat{U}_{per}$ and $\hat{U}_{par}$ to be expressed in terms of $\hat{U}_i$ as shown in general terms below,

The instantaneous velocity vector may be expressed in components relative to a fixed coordinate system x_i:

$$\hat{U}_i = \{\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_3\} \tag{3}$$

The position of a hot-wire may be given by a unity vector in the direction of the wire axis. This vector can be expressed in the following form:

$$n_i = \{\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \cos\alpha_3\} \tag{4}$$

where α_1, α_2, α_3 are the angles the wire forms with the axis of the coordinate system x_i.

The velocity components parallel and perpendicular to the wire are given by the scalar and vector product of $\hat{U}_i$ and n_i, respectively and therefore

$$\left(\hat{U}_{par}\right)_i = \left(\hat{U}_j n_j\right) \cdot n_i \tag{5}$$

$$\left(\hat{U}_{per}\right) = \left(\varepsilon_{klm}\, \varepsilon_{ijk}\, n_i\, U_j\, n_l\right) \tag{6}$$

Equations (3), (4), (5) and (6) combined yield:

$$U^2_{par} = \left[\hat{U}_1^2 \cos^2\alpha_1 + \hat{U}_2^2 \cos^2\alpha_2 + \hat{U}_3^2 \cos\alpha_3 + \right.$$
$$+ 2\hat{U}_1 \hat{U}_2 \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + 2\hat{U}_1 \hat{U}_3 \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 +$$
$$\left. + 2\hat{U}_2 \hat{U}_3 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3\right] \tag{7}$$

and

$$U^2_{per} = \left[\hat{U}_1^2\left(\cos^2\alpha_2 + \cos^2\alpha_3\right) + \hat{U}_2^2\left(\cos^2\alpha_1 + \right.\right.$$
$$\left. + \cos^2\alpha_3\right) + \hat{U}_3^2\left(\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2\right) -$$
$$- 2\hat{U}_1 \hat{U}_2 \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 - 2\hat{U}_1 \hat{U}_3 \cos\alpha_1 \cos\alpha_3 -$$
$$\left. - 2\hat{U}_2 \hat{U}_3 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3\right] \tag{8}$$

The final general expression for the effective cooling velocity of a hot-wire can be derived from equations (2), (7) and (8):

$$\hat{U}^2_{eff} = \left[\left\{\hat{U}_1^2\left(k^2\cos^2\alpha_1 + \cos^2\alpha_2 + \cos^2\alpha_3\right) + \right.\right.$$
$$\hat{U}_2^2\left(\cos^2\alpha_1 + k^2\cos^2\alpha_2 + \cos^2\alpha_3\right) +$$